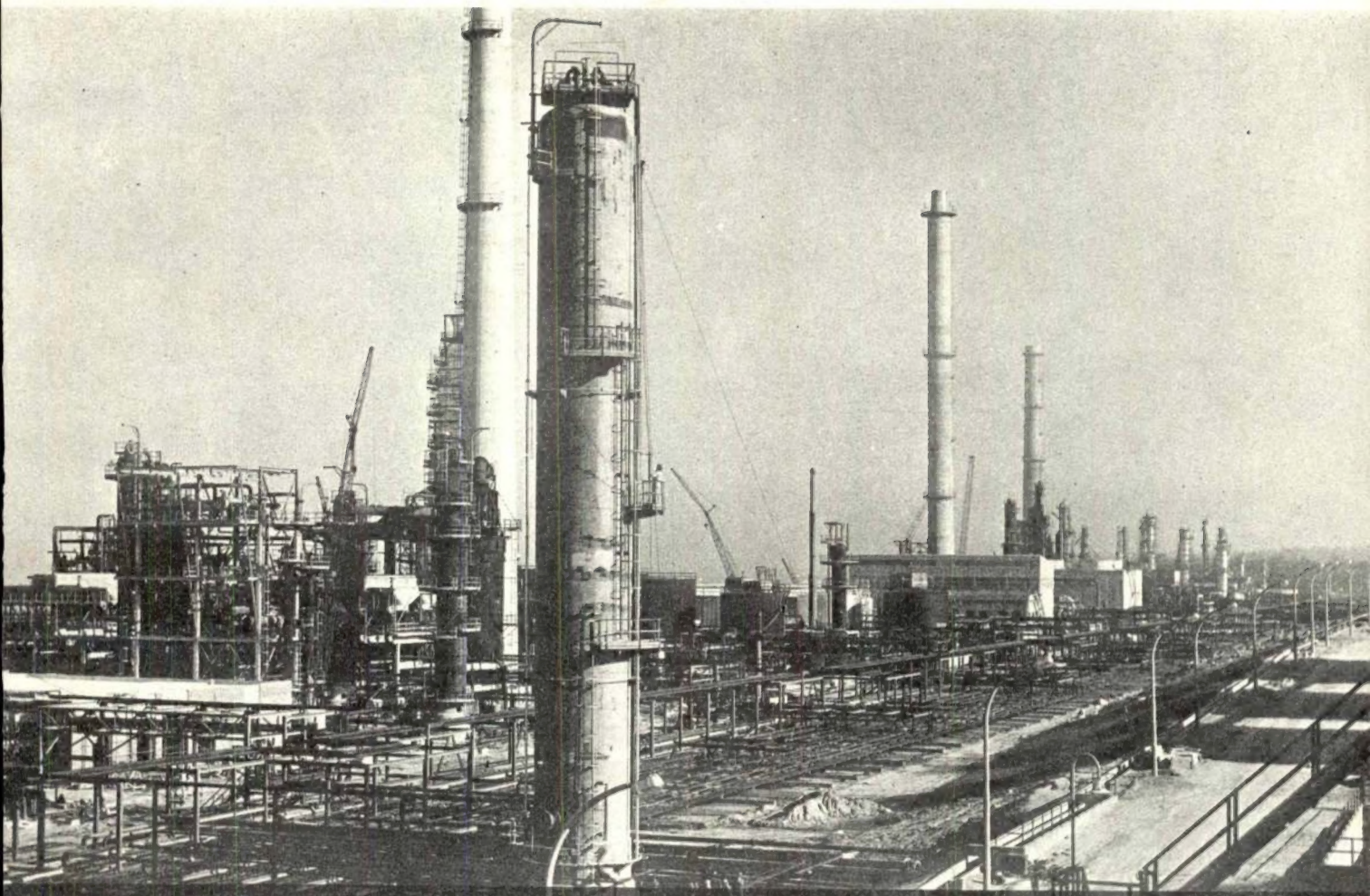
técnica



389

associação dos estudantes do instituto superior técnico

junho 1969

revista de engenharia

HELIAÇO

VARÕES DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA PARA BETÃO ARMADO TIPO A. 40
(«Heliaço» e «SNT 40»)

TENSÕES DE SEGURANÇA
Ra = 2400 kg/cm²
e
Ra = 4000 kg/cm² (SISMOS)

Literatura e Tabelas de Cálculo fornecidas gratuitamente

HELIAÇO, LDA.

R. DE S. JULIÃO, 41, 4.º D. — LISBOA

Tel.: 36 78 17 - 32 37 06 - 36 94 77

Fenner

REDUTORES DE VELOCIDADE

TIPO «PONTA DE VEIO»

mais de cem anos de progresso dos maiores fabricantes ingleses

REPRESENTANTES EXCLUSIVOS:

AUTO-LUSITANIA
ALFREDO DUARTE L.da
AV. DA LIBERDADE 73-77 LISBOA

7.000 obras realizadas

coberturas
perfis especiais
vigas pré-esforçadas
pavimento trief
protecção de segurança

materiais novobra

pavimentos
em betão pré-esforçado
(homologados pelo Lab. Nac. de Engenharia Civil)

SOCIEDADE DE PRÉ-FABRICAÇÃO E OBRAS GERAIS NOVOBRA, LDA.
AV. EST. UNIDOS DA AMÉRICA, 100 - 5.º D.º - TEL. 774832 / 771603 - LISBOA 5

CIMENTO SECIL

SECIL

Fábrica:

Outão — Setúbal

Telef. 228824/5

Escritório:

R. do Comércio, 56-3.º

LISBOA 2

Telef. 328201/2/3

técnica

NÚMERO 389 JUNHO DE 1969 ANO XLIV VOLUME XXXI PUBLICAÇÃO MENSAL

Corpo Redactorial

João M. Pereira
João Soares Alves
Rui Coutinho Torrinha
Silvério de Sousa Mendes

Editor e Proprietário

Associação dos Estudantes do Instituto Superior Técnico

Redacção e Administração

Avenida Rovisco Pais
Telefone 77 54 49
Lisboa 1

Assinaturas

		5 N.os	10 N.os
Continente e Ilhas	—	70$00	130$00
Ultramar, Brasil e Espanha	—	80$00	140$00
Estrangeiro	—	90$00	150$00

Número avulso — 20$00

Não se publica em Agosto e Setembro.

Os artigos assinados são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Composto e impresso na Tipografia Jorge Fernandes, Lda. — Rua da Cruz dos Poiais 108 — Lisboa

SUMÁRIO

449 *JÚLIO QUINTINO* — **Sistemas hidrotermais associados ao vulcanismo e sua prospecção com fins económicos. Aplicação à Região das Furnas (S. Miguel, Açores).**

Hydrothermal systems associated to the vulcanish and its prospection with economical purposes. Aplication to the region of Furnas (S. Miguel, Açores).

473 *MUFID A. SAMARRAI* — **Development of an expansive cement.**

Desenvolvimento dum cimento expansivo.

491 *VEIGA DA CUNHA* — **Evolução e posição actual dos conceitos sobre transporte sólido em escoamentos com superfície livre.**

Evolution and nowadays conceptions on sediment transportation in open-channel flow.

503 *BRAZÃO FARINHA* — **Planificação de obras.**

Planning of works.

490 **Notas informativas.**

Elementos sobre a produção e o consumo de energia na rede eléctrica nacional.

502 **Do Mundo Técnico**

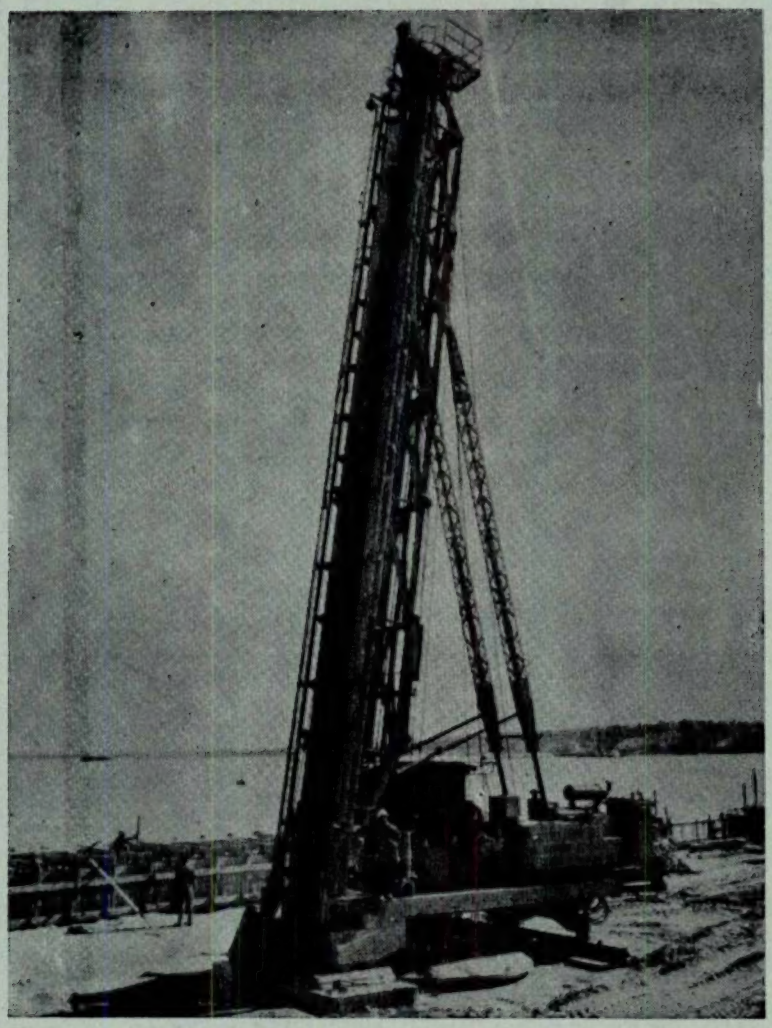
Mangueira de borracha sintética da Dupont, resistente a ácido quente — Máquinas de soldadura eléctrica fabricadas em Portugal pela Frapil.

513 **Bibliografia**

CAPA: SACOR — Refinaria do Porto, em construção.

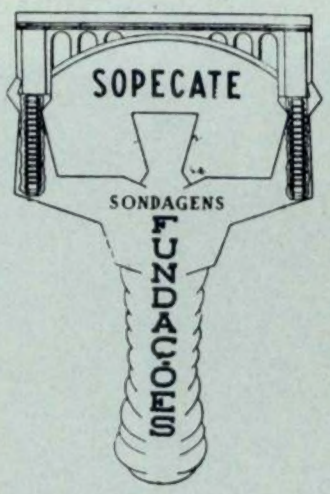
ÍNDICE ALFABETICO DOS ANUNCIANTES

	Pág.
A. Johnson & Co (Portugal), Ltd.	XXXII
Aguiar & Melo	XXXI
Araldite	V
Asea Eléctrica	V
Auto-Lusitâna	2.ª da capa
Centro Técnico Hospitalar	XXVII
Cimento Secil	2.ª da capa
Companhia de Cimentos Brancos	VI
Construções Técnicas	XVII
Dial	XXI
Durán, Garcia & Ca.	XXXIII
Electro-Arco, Lda.	II
Empresa de Cimentos de Leiria	XXXIV
Empresa Electro Cerâmica	XXIX
Empresa de Produtos Asfálticos	X
Empresa de Sondagens e Fundações Teixeira Duarte, Lda.	3.ª da capa
Empresa Técnica de Equipamentos Eléctricos	XI
Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações	XVI
Fábrica Portugal	XXII
Fanafel	XVI
Fundações Franki, Lda.	I
Frapil	XV
Guedes & Almeida, Lda.	VIII e XX
Harker Sumner	XXIV
Heliaço	2.ª da capa
Hidrel	XXVI
INA	VII
I. S. T.	XXIX
Isolux	XXVI
Jayme da Costa, Lda.	XIX
Johann Keller	XXVI
J. F. Azevedo e Silva	IV
J. Roma	VII
MAGUE	XIII
Mendes de Almeida, S.A.R.L.	XXIII
Novobra, Lda.	2.ª da capa
Prisma	XXI
Rotring	XXX
Siemens	XIV
Soc. Electricidade Brown Boveri	4.ª da capa
Soc. Michäelis Vasconcelos	XII
Soc. Amadeu Gaudêncio	XXIX
Sociedade Portuguesa Cavan	VI
Somague	XXXIV
Sondagens e Fundações A. Cavaco	II
Sondagens Ródio, Lda.	VII
Sopecate	II
SPESA	XXV
Standard Eléctrica	IX
TUDOR	XXI
Wild Portugal, Lda.	III



FUNDAÇÕES FRANKI L.DA

Um especialista em fundações



sopecate

sondagens - fundações

ESCRITÓRIO: RUA DO ARSENAL 146 2.º TELEFONES 3 40 10 - 32 02 08 LISBOA

- ESTUDOS, PESQUISAS E CAPTAÇÕES DE ÁGUA
- SONDAGENS
- REBAIXAMENTO DE NÍVEIS AQUÍFEROS
- FUNDAÇÕES

SONDAGENS E FUNDAÇÕES A. CAVACO, LDA.

R. RODRIGO DA FONSECA, 62, R/C ESQ. — LISBOA - 1
- TELEF. 56 11 71/72/73

ELECTRO-ARCO, L.DA

ELÉCTRODOS ✦ POSTOS ✦ ACESSÓRIOS
PARA A SOLDADURA ELÉCTRICA

*

MATERIAL APROVADO PELOS
LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING
BUREAU VERITAS
GERMANISCHER LLOYD

—

LISBOA
Rua Silva Carvalho, 239
Tels. 68 36 49 - 68 48 93

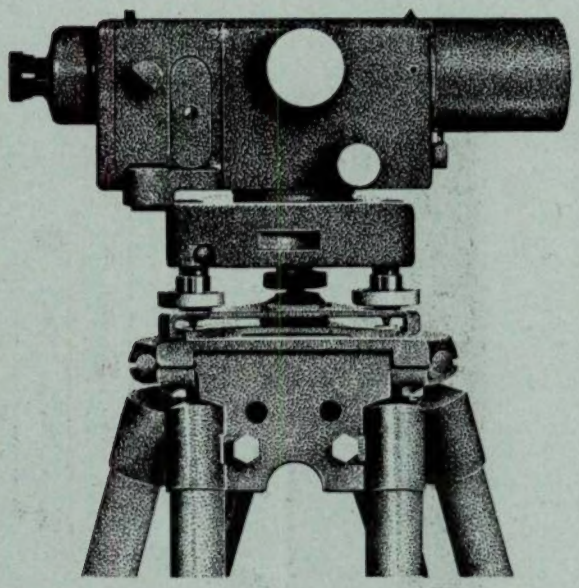
FÁBRICA E LABORATÓRIOS
Venda Nova — Amadora
Tels. 97 06 13 - 97 17 33

PORTO
Rua do Bolhão, 216
Tel. 2 12 77 - 39 44 73

O novo Nível automático de engenheiro

WILD NAK 2

com círculo horizontal



WILD
HEERBRUGG

Para nivelamentos de média e grande precisão; com micrómetro de lâmina de faces plano-paralelas para nivelamentos de grande precisão.

Erro médio para 1 Km de nivelamento duplo: ± 1,5 mm

Erro médio para 1 Km de nivelamento duplo com micrómetro: ± 0,4 mm

Luneta de 30 × de aumento com imagem direita de observação

Solicitem catálogo ou demonstração aos representantes exclusivos

WILD PORTUGAL, LDA.

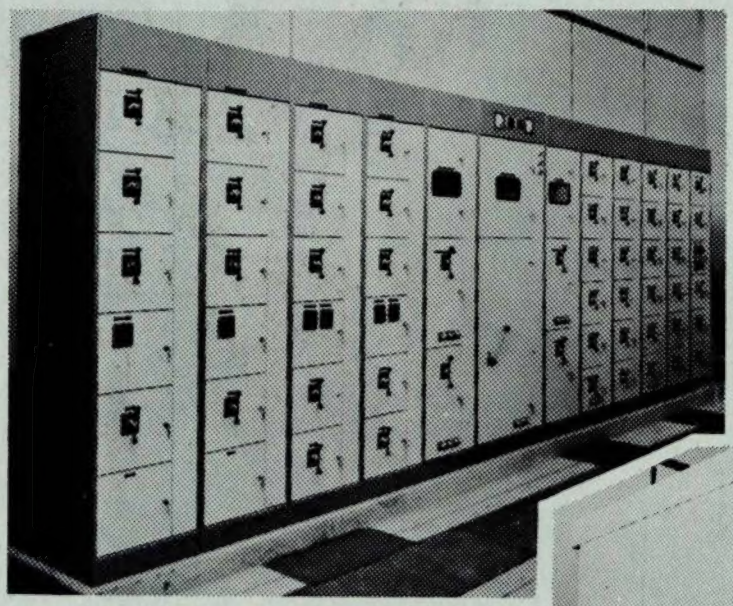
PRAÇA DAS ÁGUAS LIVRES, 8
LISBOA - 2 — TELEFONE 68 91 12

JF

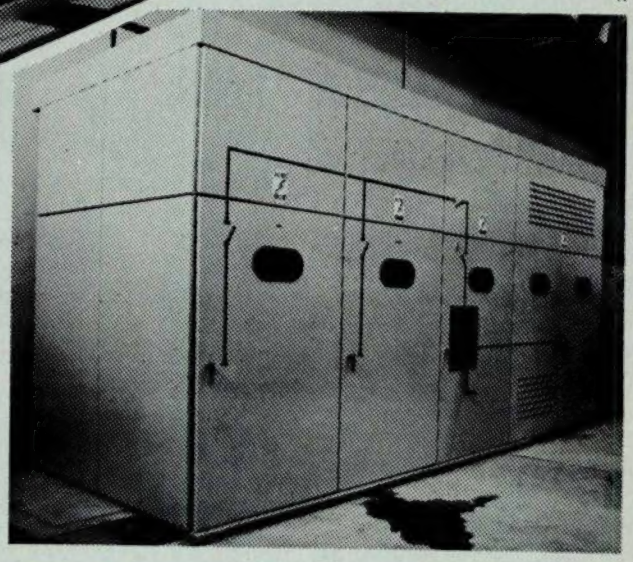
projectou e executou a instalação eléctrica da nova unidade industrial

EUROFIL

industrias de plasticos e filamentos, s.a.r.l.
povoa de sta. iria



* Posto de seccionamento e transformação clássico de 30 KV/1000 KVA
* 3 Postos de transformação pré-fabricados 30 KV/1000 KVA
* Quadros gerais e parciais, normalizados e pré-fabricados
* Iluminação especial com lâmpadas "DURO-TEST"



Todos os Postos de transformação, Quadros e Armaduras de iluminação foram fabricados nas nossas oficinas

JF

J. F. DE AZEVEDO E SILVA & C.ª, L.DA
Rua S. Francisco de Sales, 2 1º andar, Tel. 654165 — Lisboa

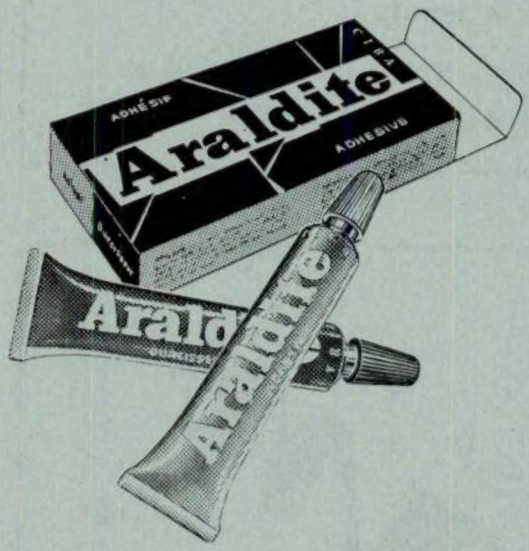
Um brilhante sucesso técnico!

ARALDITE

O mais forte dos ligantes para todo o trabalho.

Um tipo de ligante **inteiramente diferente**, de resultados seguros na colagem de

AÇO METAIS VIDRO
CERÂMICA BORRACHA PLÁSTICOS
e todo o material de uso corrente



RESISTE A

CALOR HUMIDADE ÁCIDOS
SOLVENTES ALCALIS

As ligações com **ARALDITE** mantêm-se.

Liga materiais da mesma natureza e de natureza diferente.

O ligante **ARALDITE** é mais forte que o material que liga.

Um produto Suíço da CIBA

À VENDA NAS DROGARIAS E PAPELARIAS

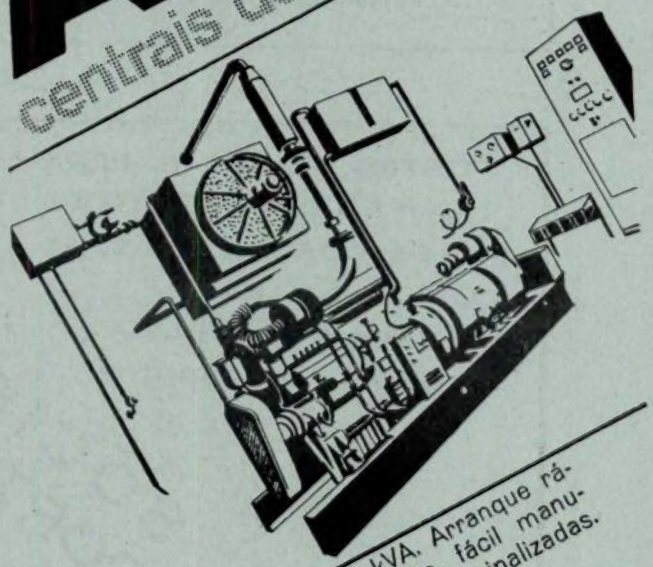
MARCA AE 7

Uma força criadora no domínio da electricidade

Grupos Electrogéneos

ASEA

centrais de emergência



Normalizados de 20 a 700 kVA. Arranque rápido e seguro, alto rendimento, fácil manutenção. Avarias automàticamente sinalizadas. Entregas rápidas, assistência garantida.

ASEA ELÉCTRICA LDA.

Estrada do Prior Velho
Tel. 2511101 (5 linhas)
SACAVÉM
R. do Campo Alegre, 144
Tel. 67239
PORTO

O EMPREGO DO CIMENTO BRANCO...

permite acabamentos mais perfeitos, mais duradouros e muito mais económicos

Estude a vantagem do emprego do

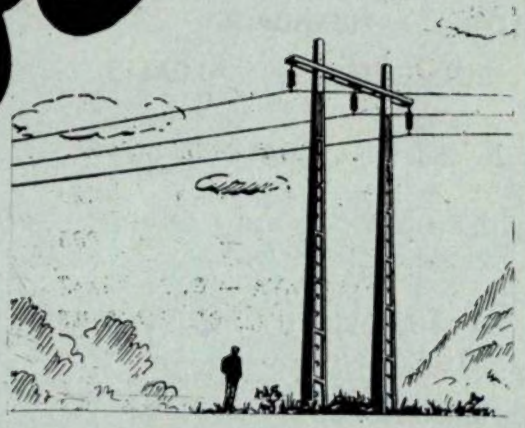
CIMENTO BRANCO LUSO

Consulte os distribuidores gerais

No Sul: **SCIAL** — T. do Corpo Santo, 15 — Telef. 66 61 86 — Lisboa
No Norte: **SCIAL** — R. do Bonjardim, 205 — Telef. 2 5779 — Porto

POSTES DE BETÃO PARA LINHAS ELÉCTRICAS
MOSAICOS E AZULEJOS
COLUNAS PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA
MANILHAS PARA ESGOTOS

SOCIEDADE PORTUGUESA **Carvam**



RUA D. ESTEFÂNIA, 94-A-LISBOA-1-TELEF. 47812-50129

• SOLDADURA ELÉCTRICA

• MATERIAL DE PROTECÇÃO

Aparelhagem de medidas eléctricas

- indicadora
- reguladora
- registadora

J. ROMA, L.DA

P. da Figueira, 12, 1.º LISBOA Tel. 865151

P. do Município, 309-6.º S. 3 PORTO Tel. 0236732

ROLAMENTOS INA DE CARGA PESADA

São rolamentos com rolos soltos universalmente utilizáveis na estrutura compacta, para altas cargas radiais. Também próprios para suportar cargas axiais. Diâmetros de veio de 70 a 380 mm.

ROLAMENTOS DE AGULHAS SCHAEFFLER, LDA.
Rua Sá da Bandeira, 790 - PORTO — Telef.: 2 11 57/8/9
Av. A. Augusto de Aguiar, 148-D - LISBOA — Telef.: 56 14 89

WABCO

WESTINGHOUSE
AIR BRAKE COMPANY
CONSTRUCTION EQUIPMENT DIVISION
PEORIA, ILLINOIS

MOTO-SCRAPERS AUTO-CARREGADORES

CAPACIDADE DE 11, 21 E 31 JARDAS CÚBICAS

NÃO NECESSITA DE TRACTOR PARA EMPURRE!
UMA SÓ MÁQUINA... UM SÓ OPERADOR...

Escarifica... Carrega... Transporta... Descarrega... Em terrenos de toda a natureza!

DISTRIBUIDOR EXCLUSIVO

GUEDES & ALMEIDA LDA.

Rua Áurea, 181-2.° — LISBOA-2 — TELEFS. 32 50 80 e 32 78 45

A STANDARD ELÉCTRICA PROJECTA-SE NO MUNDO

Na vanguarda da indústria das Telecomunicações e Electrónica, a Standard Eléctrica, dimensionada ao âmbito mundial, ocupa uma prestigiosa posição nos mercados estrangeiros. A eficiência de uma administração actualizada, a capacidade técnica dos seus engenheiros e o profissionalismo com que todos os empregados encaram as suas responsabilidades, são valores reais e positivos que, de maneira decisiva, contribuem para o engrandecimento da Standard Eléctrica e da indústria nacional. Associada da International Telephone and Telegraph Corporation, um conjunto mundial com cerca de 200 fábricas localizadas em mais de 60 países, a Standard Eléctrica fabrica numerosos produtos, desde os minúsculos transistores e circuitos integrados às grandes centrais telefónicas de serviço público, que são exportados para mais de 30 países entre os quais se destacam: Inglaterra, França, Alemanha, Espanha, Suécia, África do Sul, Brasil e Estados Unidos da América do Norte.

Standard Eléctrica **ITT**

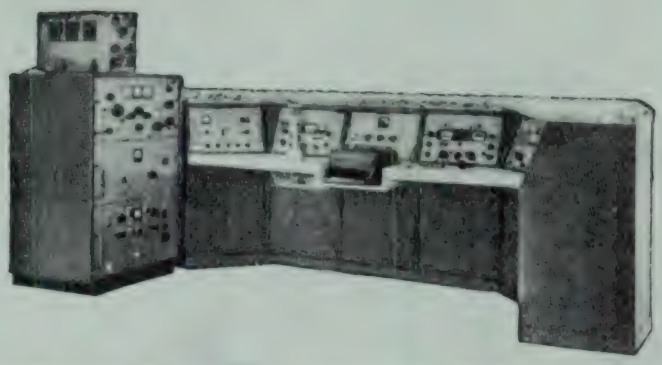
TG

PARA COLAGEM DE TACOS DE MADEIRA USE:

Também próprio para:
impermeabilizar terrenos,
paredes, fundações, etc.

FÁBRICA EM SACAVÉM

RUA FILIPE FOLQUE-10 1º— LISBOA
TELEF. 53 01 56 —TELEG. EPALDA-LISBOA



Comunicações

equipamentos
e sistemas completos

- Cuidadosamente projectados
- Amplamente experimentados
- Completamente integrados

THE TECHNICAL MATERIEL CORPORATION

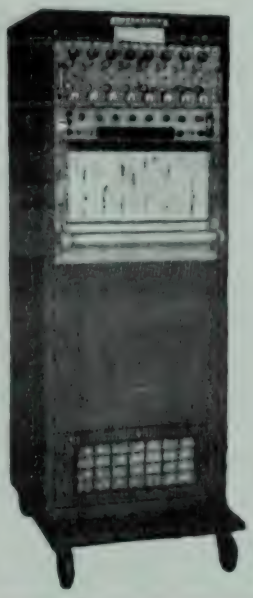
HEWLETT **PACKARD**

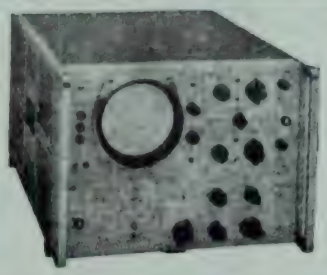
aparelhagem electrónica de medida e registo

Osciloscópios, Oscilógrafos, Voltímetros electrónicos, Geradores de sinal, Contadores electrónicos, Registadores digitais, Fontes de alimentação

Registador digital Dymec

Registador Sanborn

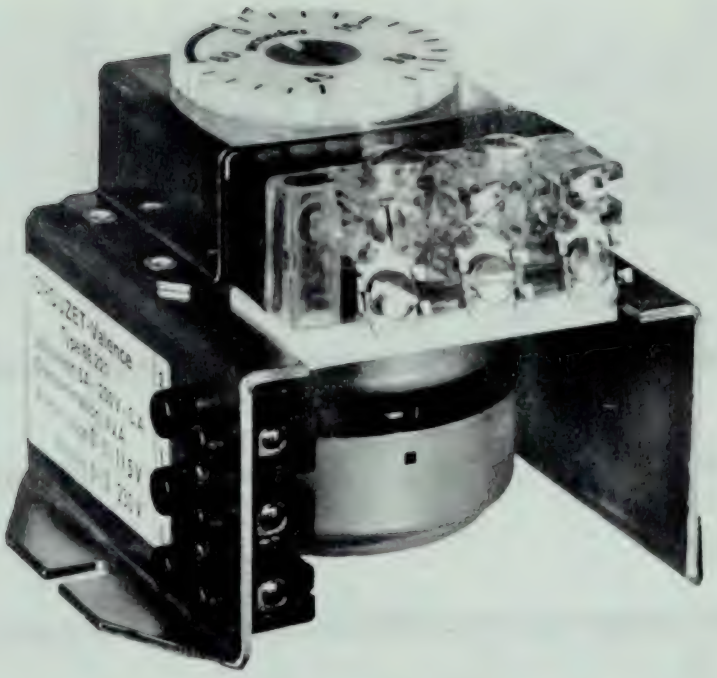




Osciloscópio HP

Contador Electrónico HP

TELECTRA EMPRESA TECNICA DE EQUIPAMENTOS ELECTRICOS, S.A.R.L.



TEMPORIZADOR MINIATURA
CROUZET

O temporizador miniatura Crouzet da série 88 221 é particularmente indicado para aplicações em que o preço e o tamanho são factores importantes.

Apresenta:

- –Custo reduzido
- –Pequenas dimensões
- –Rearme automático
- –Gamas de 0,5 a 120 seg.
- –Contactos de grande capacidade
- –Motor síncrono

ELECTROTÉCNICOS REUNIDOS, LDA.

AV. DUQUE D'AVILA, 66, 3.º TELEF 41161/5

técnica

NUMERO 389 JUNHO DE 1969 ANO XLIV VOLUME XXXI PUBLICAÇÃO MENSAL

C. D. U. 553.065

SISTEMAS HIDROTERMAIS ASSOCIADOS AO VULCANISMO E SUA PROSPECÇÃO COM FINS ECONÓMICOS APLICAÇÃO À REGIÃO DAS FURNAS (S. MIGUEL, AÇORES)

por JÚLIO QUINTINO
Licenciado em Ciências Geofísicas (Univ. Lisboa)

RESUMO

Nas regiões de natureza vulcânica, o fluxo de calor à superfície pode atingir valores 500 vezes superiores ao normal. Em particular, havendo nessas regiões água e vapor armazenados em camadas de rochas fracturadas, tem sido possível a sua exploração económica através de poços de captação do vapor a elevada temperatura.

A rentabilidade de um campo geotérmico pode ser avaliada por trabalhos de prospecção geológica e geofísica; a investigação geoquímica nas manifestações superficiais do vulcanismo — fumarolas, «geysers» e nascentes termais — tem um grande valor na determinação das características do sistema hidrotermal do sub-solo.

A região das Furnas, na ilha de S. Miguel, pela espectacular actividade de vulcanismo secundário que apresenta, parece a mais indicada a uma prospecção preliminar.

Em face da experiência adquirida noutras regiões vulcânicas — Nova Zelândia, Califórnia, Itália e Islândia — propõe-se um plano de trabalhos que só depois de cumprido permitirá uma opinião fundamentada sobre as possibilidades do aproveitamento energético das Furnas e dos Açores em geral.

SYNOPSIS

In the regions of volcanic origin, the heat flow over land may attain figures up to 500 times higher than the normal ones. Particularly, if water and steam, stored into fractured volcanic formations, exist in these regions, their economical exploitation has been possible by drilling wells to have steam at high temperature.

One can evaluate the rentability of a geothermal field by means of geological and geophysical prospection works, and the geochemical research of the superficial volcanic manifestations — fumaroles, «geysers» and hot springs — represents a valuable contribution for the determination of the characteristics of the subsoil hydrothermal system.

The region of Furnas, located at St. Michael's, seems to be the most adequate in view of a preliminary prospection, due to its spectacular activity of secondary volcanism. According to the experience obtained from other volcanic regions — New Zealand, California, Italy and Iceland — a work program is proposed, wich, as soon as it is fulfilled, will give a correct idea about the possibilities for taking advantage of the geothermal energy of Furnas, as well as of that of the Azores in general.

1. PRINCÍPIOS GERAIS

As temperaturas do sub-solo observadas em minas e poços provam a existência de um gradiente com valores oscilando entre 10° e 50° C/km. Este gradiente é devido ao fluxo de calor através das rochas da crosta terrestre, o qual pode ser estimado desde que se conheçam as condutibilidades térmicas médias dessas rochas. Os valores das condutibilidades dos minerais mais abundantes na crosta terrestre têm sido obtidos em laboratório (MISENER & BECK, 1960, p 47) e oscilam entre 0,0045 (feldspatos) e 0,0170 (quartzo) unidades cgs [cal/cm × s × (°C)]. Mas normalmente as rochas são constituidas por misturas de minerais e apresentam-se quase saturadas de água, principalmente se são porosas ou muito fracturadas; assim, as medições efectuadas directamente no terreno têm conduzido a valores médios da ordem de 0,0033 unidades cgs. Utili-

zando este valor e um gradiente de temperatura $dT/dx = 30°$ C/km, a expressão de Fourier ($q = k \times \frac{dT}{dx} \times S$, onde q é o débito de calor através da superfície S dum terreno com a condutibilidade k) leva a uma estimativa, para o fluxo médio de calor por condução na crosta terrestre, de cerca de 10 000 cal/km$^2 \times$ s. Parte deste calor é proveniente da desintegração dos elementos radioactivos e outra parte é consequência do arrefecimento natural da Terra.

Desvios importantes em relação àquele valor do fluxo médio de calor, terão que ser procurados tomando em conta os seguintes factores principais: distribuição irregular dos materiais radioactivos, dissipação de calor de origem mecânica (movimentos tectónicos), reacções químicas no sub-solo e movimentos de fluidos e magma. É este último factor que deve ser considerado como principal responsável pelos valores mais elevados dos fluxos de calor à superfície e também pràticamente o único a considerar do ponto de vista económico, pois só nas áreas onde ele é dominante tem sido possível a produção de água ou vapor a elevadas temperaturas, os quais podem ser utilizados ou directamente ou como fontes de aquecimento para outros fluidos motores. Nestas regiões hidrotermais tem-se medido fluxos de calor 50 a 500 vezes superiores ao normal: em Torfajökull (Islândia), o valor de 5×10^{-4} cal/cm$^2 \times$ s (BODVARSSON, 1964) é cerca de 500 vezes maior que o fluxo normal de condução do calor terrestre. Evidentemente que anomalias desta natureza são circunscritas a áreas muito limitadas e aqui já não se pode falar apenas de perdas de calor por condução, pois que a descarga de água por emanações gasosas ou nascentes termais é a quota principal dessa dissipação.

1.1 — As fontes de energia geotérmica

Os campos geotérmicos, como o referido acima, dissipam calor em tão grande escala, à superfície da terra, que somos levados a admitir uma relativa proximidade do magma, propagando-se o calor a todas as rochas circundantes e aos fluidos que por elas circulam. O estudo desses campos e de alguns aproveitamentos industriais da energia disponível permite classificá-los em dois tipos genéricos.

O primeiro tipo julga-se estar associado à existência de um batólito de rochas ácidas que teria alcançado uma profundidade relativamente pequena sem contudo ter originado efusão de lava; acima da massa intrusiva admite-se um sistema de fracturas afectando as camadas sedimentares e favorecendo a circulação dos fluidos endógenos, assim como a presença de zonas permeáveis ou porosas onde se armazenam; finalmente, uma cobertura de rochas impermeáveis asseguraria a conservação dos fluidos a alta temperatura e pressão. A especulação sobre as possibilidades energéticas das intrusões do magma tem levado a resultados muito significativos: calculou-se que, pelo arrefecimento de uma massa intrusiva (980° — 38° C) com um volume aproximado de 4 km^3, hoje posta a descoberto pela erosão em Devils Tower (U. S. A.), teria sido libertado calor suficiente para alimentar um gerador de 4000 kw durante 7000 anos (DECIUS, 1964).

Os campos geotérmicos deste primeiro tipo, embora considerados dos mais produtivos, opõem dificuldades à sua descoberta em virtude de não apresentarem uma nítida expressão à superfície.

O contrário se pode afirmar do segundo tipo de anomalias geotérmicas, ligadas ao vulcanismo; aqui, as expressões superficiais são em norma profusas e tornam a sua identificação imediata: rochas ígneas extrusivas retendo ainda algum calor devido à recente actividade; caldeiras ou cones vulcânicos desmoronados mostrando um vulcanismo em vias de extinção, mas com manifestações secundárias mais ou menos espectaculares, fumarolas e solfataras, «geysers», fontes termais, lamas quentes, alteração hidrotermal do solo. Claro, que a simples identificação de um campo geotérmico deste tipo não autoriza a previsão de uma produção económica de energia, pois é necessário atender às condições físico-químicas dos fluidos no sub-solo e verificar se a sua jazida satisfaz as seguintes exigências de estrutura geológica consideradas fundamentais:

a) Presença a certa profundidade de camadas porosas ou vacuolares, geralmente tufos vulcânicos ou mantos de lava, para armazenagem do vapor e água quente.

b) Existência de uma cobertura rochosa semi-permeável, que apresente algumas fracturas para

facilitar a circulação dos fluidos, mas capaz de proteger parcialmente o reservatório.

A energia geotérmica está actualmente a ser aproveitada em explorações hidrotermais quer do tipo intrusivo quer do vulcânico e muitas outras se encontram em fase de prospecção. Podemos citar como exemplos de aproveitamentos do primeiro tipo, os campos geotérmicos de captação de vapor sobreaquecido de Larderello em Itália (335 000 kw em 1961) e «The Geysers» na Califórnia (12 500 kw em 1960); e no segundo tipo, os campos de produção de água e vapor saturado da Islândia, com um potencial fabuloso já em exploração activa; El Salvador onde se projecta a instalação de uma central de 50 000 a 100 000 kw e Wairakei, na Nova Zelândia (192 600 kw em 1965).

1.2. — Sistemas hidrotermais associados aos campos geotérmicos

Na medida em que todos os aproveitamentos geotérmicos estão a ser realizados à custa de calor transportado pela água e vapor naturais, o comportamento dos sistemas hidrotermais nas zonas de elevado fluxo de calor deve ser objecto de estudo intensivo. É evidente que cada área hidrotermal há de ser particular nos processos de aquecimento, nas profundidades de jazida dos fluidos e nos canais de circulação utilizados, na composição química e nas temperaturas e pressões a que se encontram nos reservatórios produtivos. Mas as conclusões já tiradas autorizam o enunciado de alguns princípios gerais de real valor, nomeadamente na perspectiva do estudo de um novo campo geotérmico.

Uma primeira evidência que ressalta das investigações realizadas diz respeito à génese e aquecimento das águas termais. Se toda a água que circula a grande profundidade, num campo geotérmico, fosse derivada do magma, o seu conteúdo em cloro seria da ordem dos 20 g/l, na base de que a água dos oceanos é originàriamente magmática; ora as maiores concentrações de cloro encontradas nas águas de várias zonas vulcânicas não ultrapassam muito 1,5 g/l, indicando uma contribuição magmática de cerca de 8 por cento. Trabalhos fundamentais de análise pelos isótopos radioactivos (GRAIG, BOATO & WHITE, 1956) têm confirmado isso, mostrando que a quantidade de vapor magmático em todas as regiões estudadas (Larderello, Wairakei, «The Geysers», Yellowstone Park e Islândia) não excede os 5 a 10 por cento da água total.

Por outro lado, se todo o calor absorvido pelos fluidos hidrotermais lhes fosse fornecido pelo vapor de origem magmática, mais de 20 por cento deste se encontraria integrado nos fluidos (WHITE, 1957). O calor em jogo deve por isso derivar muito mais da condução nas rochas do que da convecção do vapor magmático.

Podemos pois aceitar como geral que a quase totalidade da água em circulação nos campos geotérmicos é de origem meteórica, infiltrando-se até grandes profundidades onde é aquecida e em parte vaporizada; formam-se assim por este mecanismo, em camadas rochosas cuja porosidade permita a acumulação, grandes reservatórios de água e vapor saturado a elevada temperatura (águas cloretadas), geralmente entre os 200° e 300° C, com uma composição química devida a processos de ataque e solução das rochas ígneas, activados pelos gases e sais (principalmente cloretos alcalinos) dissolvidos e transportados no vapor a alta pressão que contìnuamente se liberta do magma.

Esta teoria geral da circulação e aquecimento das águas termais vulcânicas, assim como o teor das suas composições químicas, tem sido confirmada pelo estudo de numerosas colheitas de água e vapor obtidas em furos profundos; por toda a parte onde foi possível atingir importantes reservatórios de fluidos a alta temperatura (URSS, Nova Zelândia, Islândia, etc) se observou que, na generalidade, as composições químicas eram semelhantes: baixa mineralização (<5 g/l) e elevada concentração de sílica, até 600 mg/l; grandes quantidades de cloretos dos metais alcalinos e frequente presença de boro; os constituintes gasosos misturados na fase de vapor são principalmente o anidrido carbónico, o azoto, o ácido sulfídrico e o hidrogénio. A sua contribuição raramente totaliza 0,1 por cento do vapor e é mais um indício da fraca importância dos componentes magmáticos, pois o vapor «primário» é muito mais rico em gases, tendo conteúdos de 2 a 3 por cento (WILSON, 1964).

Convém aqui fazer uma referência especial às regiões já conhecidas como produtoras de vapor sobreaquecido — Larderello e «The Geysers»; as camadas rochosas superficiais de ambas as zonas, devido à sua espessura e impermeabilidade,

dificultam a infiltração abundante da água meteórica e por esse motivo a quantidade de calor é muito grande em relação à quantidade de água, originando que toda ela se vaporize a determinado nível, não sendo possível também a condensação do vapor de origem magmática e a formação dum corpo de águas cloretadas (WHITE, 1964).

No entanto, para a maioria dos casos será de esperar o encontro com uma camada profunda de águas cloretadas, manancial não só do vapor saturado captado em poços mas ainda das manifestações naturais à superfície: fumarolas, «geysers», águas termais, etc. Uma observação sumária destes fenómenos fará descrer da possibilidade de uma fonte comum, devido à multiplicidade de aspectos que a dissipação do calor à superfície assume, e de facto esses fenómenos podem constituir manifestações esporádicas ou muito individualizadas. Mas muitas outras vezes não são mais que expressões diversificadas do mesmo reservatório aquífero profundo, resultantes de transformações físicas ou químicas que os fluidos sofrem no seu trajecto até à superfície. Segundo LLOYD (1963) os 4 tipos principais de nascentes termais derivam todos duma mesma origem:

a) Águas ácidas sulfatadas.

Este tipo é caracterizado por pequenos caudais de águas com pH 2-5, altas concentrações de ião sulfato e ausência quase total de cloro; as temperaturas variam de 30° a 99 °C, havendo abundantes emanações gasosas. A descarga de água sofre uma influência directa da pluviosidade, o que leva a crer que tanto o aquecimento como a composição química lhe são fornecidos pelo vapor que flui das zonas profundas de água cloretada, dando-se à superfície a oxidação do ácido sulfídrico nele transportado. As nascentes termais ácidas costumam aparecer a nível superior ao das demais manifestações superficiais dum campo geotérmico; os charcos de lamas quentes são incluidos nesta categoria.

b) Aguas cloretadas-sulfatadas.

As fontes termais deste tipo diferem das anteriores por terem um teor elevado de cloro e descargas moderadas (1-3 l/s) sem influência da pluviosidade. A água é ácida (pH 2-5), com temperaturas perto do ponto de ebulição e o ferro aparece também na sua composição. Este facto só pode ser explicado pelo contacto prolongado duma água sulfatada com as rochas; a mistura de águas cloretadas com o sulfato transportado nas emanações magmáticas de alta temperatura oferece uma explicação satisfatória.

c) Águas cloretadas

Nestas nascentes o elemento principal é o cloro, aparecendo também os sulfatos e os bicarbonatos em fraca percentagem. Emanações gasosas de anidrido carbónico e ácido sulfídrico são frequentes, mas moderadas. Os pH são de 6 a 8,5 e as temperaturas de 60° a 101 °C, correspondendo as águas mais quentes às de maior teor de cloro. Este tipo de nascentes é considerado como o mais representativo das águas hipertermais profundas captadas directamente em poços.

d) Águas cloretadas-bicarbonatadas

Têm características comuns com as águas do tipo anterior, mas as concentrações de cloro são baixas enquanto as do bicarbonato se elevam até 500 mg/l. Admite-se que as fontes bicarbonatadas sejam derivadas de águas cloretadas hipertermais onde a estrutura da crosta seja propícia à separação e subida do vapor, que se misturaria à água superficial não mineralizada. Como o gás mais abundante no vapor vulcânico é o anidrido carbónico, o ataque deste aos minerais das rochas daria a composição característica das águas bicarbonatadas. Em favor desta teoria a observação indica uma incidência de altas concentrações gasosas nas águas bicarbonatadas; assim, estas águas teriam uma formação superficial e é de admitir que sob elas se encontre uma zona de águas muito mais quentes.

2. PROSPECÇÃO DUM CAMPO GEOTÉRMICO, INVESTIGAÇÃO À SUPERFÍCIE

O método mais directo e eficaz de prospecção consistirá na abertura de furos de ensaio em número suficiente para estabelecer um esquema conforme com a realidade física da área em estudo. Mas a experiência já adquirida tem mostrado relações muito íntimas entre o comportamento interno dum campo geotérmico e alguns levantamentos e observações executados à super-

fície, pelo que é de todo o interesse conduzir uma série exaustiva e sistemática de trabalhos dessa natureza antes de empreender quaisquer perfurações, sempre muito dispendiosas. Os dados fornecidos pelo «Department of Scientific and Industrial Research» da Nova Zelândia (DOYLE & STUDT, 1964) sobre as suas actividades em áreas geotérmicas mostram que o custo de um ano de investigação intensiva é inferior ao da abertura de um simples furo de prospecção; compreende-se a vantagem económica de um bem elaborado plano de estudos à superfície quanto mais não seja se em consequência dele se dispensarem alguns furos de ensaio.

Deverá pois aceitar-se como normal a criação de um serviço científico ligado a qualquer projecto de aproveitamento geotérmico e com o apetrechamento técnico apropriado a estudos nos domínios da geologia, hidrologia, geofísica e geoquímica que ofereçam ao economista e ao engenheiro apoio para as bases dum planeamento industrial; será ainda necessária a permanência do serviço científico durante a vida produtiva do campo geotérmico para estudar a sua resposta à exploração, predizer futuras tendências e prestar assistência a novas iniciativas.

É de aconselhar o estudo preliminar de todas as informações disponíveis, quer de índole histórica (descrição de erupções vulcânicas, etc) quer técnica, assim como dos levantamentos regionais (topográficos, geológicos, hidrológicos ou geofísicos) executados embora noutras escalas e com fins diversos; todo esse acervo de informações pode lançar luz sobre a interpretação dlaguns fenómenos locais do campo geotérmico e orientar os trabalhos específicos de prospecção, cujas conclusões podem ser válidas no esclarecimento das seguintes questões:

1) extensão do reservatório geotérmico;
2) avaliação da potência disponível;
3) características do sistema hidrotermal.

2.1 — Extensão do reservatório geotérmico

A identificação duma zona termal de origem vulcânica é imediata porque a dissipação do calor à superfície toma aspectos bem visíveis, como sejam as descargas de água e vapor, a alteração hidrotermal do terreno e a versatilidade do revestimento vegetal acompanhando as variações da temperatura do solo. Mas a limitação rigorosa dum campo geotérmico, quer dizer, a determinação da área de fluxo médio de calor superior ao normal, envolve a utilização de técnicas instrumentais de observação especialmente adaptadas à detecção de zonas anómalas, como sejam os levantamentos da resistividade eléctrica das rochas, da componente vertical do campo geomagnético e de temperaturas no sub-solo.

A aplicação do método da resistividade eléctrica fundamenta-se no facto de que a resistividade duma formação rochosa decresce de maneira muito sensível com o aumento da temperatura — um mesmo terreno aquecido de 17° a 150 °C ficará com uma resistividade 5 vezes menor e se passar de 17° a 280 °C ela diminuirá 9 vezes (BREUSSE, 1964). O sistema mais usualmente adoptado na prospecção é o de Wenner, no qual se aplica uma tensão eléctrica contínua a pares de eléctrodos introduzidos alguns centímetros no terreno e igualmente distanciados da estação; é evidente que quanto maior a distância entre os pares de eléctrodos, mais funda a penetração da corrente eléctrica no terreno e por isso se pode fazer variar a profundidade de investigação, obtendo em cada estação valores de resistividade das rochas a vários níveis. Este método tem tido alguma aceitação entre os investigadores de vários países e na Nova Zelândia mostrou-se eficaz na determinação das áreas termais, dado o grande contraste entre a resistividade das zonas «quentes» e a das zonas «frias», em média 60 para 600 ohms × metro (STUDT, 1964); mas como método dinâmico, isto é, capaz de revelar o campo da temperatura em função da profundidade, enferma de muitas limitações pois que os valores da resistividade medidos podem ser muito influenciados pela salinidade da água intersticial e a quantidade desta depende do grau de porosidade das formações rochosas. A interpretação dos dados pode portanto resultar complicada; por essa razão e sem embargo da rapidez e facilidade de execução, o método só tem um valor complementar.

Igualmente expeditos e muito pouco dispendiosos são os levantamentos geomagnéticos, por vezes utilizados no reconhecimento de um campo geotérmico. Em geral mede-se apenas a componente vertical e os baixos valores observados atribuem-se à transformação da magnetite (Fe_3O_4)

das rochas em pirite ($Fe\ S_2$), reacção química provocada pelo ácido sulfídrico — gás que só se encontra nas áreas hidrotermais. As observações deverão ser cuidadosamente executadas numa rede de estações relativamente apertada (500 metros ou menos) e todas reduzidas a uma época comum, como é usual em levantamentos deste tipo. As dificuldades de interpretação são evidentes se nos lembrarmos que anomalias geomagnéticas negativas não são exclusivamente representativas da conversão da magnetite em pirite; por exemplo, podem ser devidas à ausência de magnetite nas rochas. Por outro lado, se existir sob o reservatório hidrotermal uma camada rochosa de elevada magnetização, já a magnetite nela contida se transformará em muito menor percentagem e as anomalias à superfície virão muito atenuadas.

Referimos dois métodos indirectos de detectar anomalias geotérmicas, a partir de anomalias da resistividade das rochas e do campo magnético terrestre; mas a ambiguidade de interpretação dos dados, em ambos os casos, aconselha a aplicação de outros métodos de observação mais directos para o fim em vista — levantamentos de temperaturas no sub-solo. Qualquer plano de levantamento deve sujeitar-se à necessidade duma determinação rigorosa das áreas de anormal fluxo de calor com o menor dispêndio e a máxima rapidez. Há que escolher uma profundidade, para tomada das temperaturas, que satisfaça esses requisitos: um compromisso entre as pequenas profundidades onde as perturbações das variações climáticas diurnas e estacionais são muito importantes e as grandes profundidades onde essas variações já não são significativas, mas que em contrapartida tornariam as medições muito lentas e dispendiosas. Os geofísicos neozelandeses elegeram a profundidade de 1 metro para os seus levantamentos preliminares, executados com assinalado êxito em várias regiões hidrotermais (THOMPSON & al., 1964).

A técnica das observações resume-se como segue: utilizando pares termo-eléctricos (cobre-constantan ou ferro-constantan) e potenciómetros portáteis de leitura, medem-se temperaturas a 1 metro de profundidade ao longo de linhas de levantamento bem definidas no terreno — estradas, caminhos, muros, valas, margens de ribeiros, etc.; as estações devem ser distanciadas de cerca de 60 metros e uma densidade aproximada de 50 estações/km^2 é considerada suficiente; as temperaturas lidas serão corrigidas das perturbações devidas às variações climáticas reduzindo as observações a uma mesma data, para o que se terá que dispor de uma estação base, fora da área termal, com registo de valores normais da temperatura a 1 metro de profundidade. Convencionando-se que a temperatura de 1 °C acima do valor normal é a mínima significativa, a linha que unir as estações com essa temperatura dará o contorno do campo geotérmico; outras isotérmicas devem ser determinadas, por exemplo, as dos 20 °C e 50 °C acima do valor normal. Numa boa carta topográfica da região é fácil fazer a implantação do levantamento, traçar as isotérmicas e medir as áreas respectivas.

2.2 — Avaliação da potência disponível

Além da área total da formação geotérmica, os levantamentos de superfície fornecem indicações sobre os valores dos débitos de calor e de massa (água e vapor) correspondentes às perdas naturais sofridas pelo sistema hidrotermal. A medição dos primeiros débitos executa-se tomando em conta os vários processos de dissipação do calor: por condução e convecção através do solo na descarga de vapor das fumarolas, solfataras, etc., por evaporação e radiação das superfícies de água quentes, nos caudais das nascentes termais e «geysers» quer directamente para a atmosfera quer para o leito dos cursos da rede hidrográfica da região (underground seepage). Os métodos e instrumentos usados em levantamentos desta ordem serão descritos adiante.

a) Fluxos de condução através do solo

Vimos acima que o valor do gradiente normal de temperatura na crosta terrestre e uma condutibilidade térmica do solo de 3×10^{-3} unidades cgs levaram a estimar o fluxo médio de condução em 0,01 cal/$m^2 \times$ s. Anomalias locais observadas em áreas hidrotermais variam de 1 a 20 cal/$m^2 \times$ s, desde que não haja simultâneamente emanações de vapor de água. Para a determinação rigorosa dos fluxos de condução, as condutibilidades térmicas do terreno têm que ser medidas, por exemplo, com um disco de Lee e um gradiómetro (THOMPSON & al., 1964); mas na prática, o valor médio dos gradientes obtidos pelas observações

da temperatura a 1 metro de profundidade é associado a um valor da condutibilidade assumido entre 10^{-3} e 3×10^{-3} unidades cgs, com o que uma estimativa do fluxo de calor de condução é viável. O seu produto pela área geotérmica total, já medida, dar-nos-á o débito de calor dissipado por radiação do solo.

b) Fluxos de convecção através do solo

Alguns autores (ROBERTSON & DAWSON 1964) têm evidenciado, em certas regiões, uma mudança nas características da dissipação do calor que ocorre quando a temperatura a 1 metro de profundidade atinge cerca de 25 °C acima da temperatura ambiente: o fluxo torna-se predominante convectivo, dando origem a emanações de vapor (steaming ground) que são visíveis quando a humidade atmosférica é elevada; em certas áreas chega a ter valores de 2000 cal/m$^2 \times$ s. A medição do calor transportado no vapor de água implica o uso de instrumentos apropriados. Enquanto os fluxos não ultrapassam as 500 cal/m$^2 \times$ s, o calorímetro descrito por BENSEMAN (1959) opera satisfatòriamente; acima desses valores devem usar-se processos que se baseiam no funcionamento da tubeira de Venturi: tubeira convergente-divergente munida de manómetro diferencial para medir a variação de pressão à entrada e no estrangulamento (PALACIOS, 1947, p 138). Curvas de calibração do instrumento dão o fluxo de calor em função da temperatura dos fluidos e da diferença de pressão (THOMPSON & al., 1964). Com base num grande número de observações directas e na distribuição das temperaturas numa camada superficial do solo de 15 centímetros de espessura, foi possível a elaboração de gráficos (THOMPSON & al., 1964) relacionando os valores do fluxo com parâmetros medidos no terreno com grande simplicidade e rapidez de operação. Mas não se deve esquecer que esses gráficos se referem a determinados tipos de solo e a um conjunto definido de condições à superficie; em circunstâncias diferentes há que executar medições directas e elaborar novos gráficos.

c) Escape de vapor em fumarolas

O calor transportado no vapor de descarga das fumarolas, cujos diâmetros variam de poucos centímetros a 1 metro é mais, representa uma contribuição muito importante no débito total duma área hidrotermal. Os fluxos respectivos oscilam entre 10^6 e 2×10^7 cal/m$^2 \times$ s dependendo principalmente da velocidade de escape dos gases. Um tubo de Pitot (PALACIOS, 1947, p 102) montado em conjunto com um par termo-eléctrico é usado com frequência para medir essa velocidade e a temperatura do vapor. As curvas de calibração (THOMPSON & al, 1964) do instrumento permitem calcular os fluxos de calor em função das diferenças de pressão dinâmica e estática da corrente fluida e da sua temperatura.

d) Evaporação e radiação nas superfícies de água quente

Os métodos usados para avaliar as perdas de calor nas superfícies de águas calmas e nas bacias de águas em ebulição ou de lamas quentes têm conduzido a valores que oscilam entre 10^3 e $1{,}5 \times 10^6$ cal/m$^2 \times$ s. As observações no terreno executam-se com facilidade, medindo a temperatura e as superfícies das águas quentes expostas ao ar; uma curva como a desenhada por BENSEMAN (1959, a), relativamente às condições climáticas (humidade e velocidade do vento) normais em vastas áreas geotérmicas da Nova Zelândia, dará imediatamente o débito do calor dissipado por evaporação e radiação. Não existem no momento presente métodos simples e directos para determinar os valores correspondentes à evaporação de superfícies de água em ebulição, mas alguns autores têm estimado que os fluxos chegam a ser dez vezes superiores aos das águas calmas (ROBSON & WILLMORE, 1955).

c) Descarga de nascentes termais

Os caudais das nascentes termais assim como as suas temperaturas à emergência podem ser medidos directamente e os débitos de calor calculados em relação a uma dada temperatura, normalmente a temperatura média anual do ar na região. Este procedimento, no entanto, não é seguido nos levantamentos geotérmicos, principalmente porque a maior parte do calor das nascentes se escoa por via subterrânea — para os cursos de água que atravessam a região. Daí a razão por que as medidas executadas em rios e ribeiras são uma base de cálculo mais rigorosa

do que a soma dos débitos de calor das descargas individuais. Com o propósito de obter valores relativos às perdas visíveis e ocultas das nascentes termais, são observados semanalmente pelos serviços de hidrologia do «Ministry of Works» da Nova Zelândia (HUNT, 1964) os caudais e as temperaturas em dois locais de cada curso de água — o primeiro antes da recepção de águas quentes e o segundo após a mistura.

Passámos em revista, muito ràpidamente, alguns métodos de observação dos vários tipos de fluxo de calor que é de regra encontrar num campo geotérmico e que permitem uma estimativa do débito total do calor dissipado naturalmente. Esta grandeza é habitualmente expressa em kcal/s (quilocalorias por segundo) e referida a uma determinada temperatura. Se exceptuarmos as perdas de calor por radiação do solo e das superfícies aquosas, todas as outras formas de dissipação são carreadas pelos fluidos do sistema hidrotermal. Veremos agora como calcular os débitos de massa em água e vapor.

No que se refere às alíneas b), c) e d) pode supor-se, para facilitar o cálculo, que a descarga natural de vapor tem lugar a 100 °C. O facto de se incluir o calor irradiado pelas superfícies de água quente na estimativa da quantidade de vapor introduz um erro, que no entanto é de desprezar em face do calor transportado por evaporação.

Quanto à descarga de massa das nascentes termais, como as temperaturas são muito variáveis, não deve ser calculada a partir do débito de calor obtido em e), mas por qualquer dos seguintes processos: diferença dos caudais dos cursos de água antes e depois da mistura com os fluidos termais; medição directa dos caudais das fontes, com o risco de não incluir grande parte da água que se escoa de nascentes ocultas; finalmente, por processos químicos, analisando o aumento da concentração mineral em ribeiras e rios drenando áreas de águas termais. Este último processo pressupõe a hipótese de que as diferentes fontes têm uma mineralização aproximadamente constante, o que na verdade acontece, em muitas regiões geotérmicas já estudadas, em relação aos conteúdos de cloro (ELLIS & WILSON, 1955), sílica e outros componentes.

Determinados assim os débitos de calor e de massa (em quilogramas por segundo) e considerando que as trocas do calor em jogo se fazem a pressão constante, é possível calcular a entalpia específica (em calorias por grama) da descarga natural do sistema hidrotermal — quociente entre os dois débitos estimados dos levantamentos de superfície. É o valor da entalpia específica que vai ser utilizado na avaliação da potência que o campo geotérmico pode fornecer. BANWELL (1964) elaborou alguns gráficos com este propósito, dois dos quais são reproduzidos (VER ANEXOS) nas fig. 1 e 2. Na fig. 1, a potência disponível em kw por kg/s dos fluidos é tomada como função da entalpia específica. Uma outra escala é adicionada ao gráfico, dando a profundidade a que se presume seja encontrada a temperatura de base T_0 dos fluidos, na hipótese de que a água do sistema se encontra sempre no ponto de ebulição correspondente à pressão hidrostática a cada nível. O gráfico dará portanto não só indicação da potência de que virtualmente se dispõe, com a previsão da profundidade que os furos de prospecção deverão atingir. A potência total da dissipação natural do calor é obtida multiplicando o valor lido no gráfico (kw por kg/s) pelo débito total de massa (água mais vapor).

Pela fig. 2 é possível fazer uma estimativa imediata da energia armazenada num reservatório de rochas porosas saturadas de água, a partir do conhecimento da área do campo geotérmico e da entalpia específica da actividade natural. No cálculo das curvas de energia do gráfico supõe-se que só 25 por cento da energia teórica armazenada estará livre para utilização. No quadro I é mostrado um exemplo de aplicação dos gráficos 1 e 2 a dados de observação relativos aos débitos de calor natural medidos em Wairakei (FISHER, 1964) por vários autores, entre 1951 e 1959, e considerando uma área geotérmica levantada em 1960 (THOMPSON & al., 1964) pelo método das temperaturas a 1 metro de profundidade.

2.3 — Características dos sistemas hidrotermais

A experiência adquirida em muitas áreas hidrotermais, onde já estão em curso aproveitamentos geotérmicos ou perfurações de ensaio, permite relacionar simples observações de fenómenos naturais — emanações de vapor, fontes termais e outros — com as características prová-

MAGUE

ANTEDISTRIBUIDOR EM FABRICO, PARA UMA DAS 3 TURBINAS KAPLAN DE 100.000 CV DESTINADAS A CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE CARRAPATELO

(Colaboração com K.M.W. - NOHAB).

PONTES ROLANTES, GUINDASTES E APAR. DE ELEVAÇÃO ESPECIAIS	*Projecto e fabrico*
TURBINAS HIDRÁULICAS	*Fabrico segundo licença de A. C. M. de Vevey, S. A.*
TURBINAS A VAPOR	*Fabrico segundo licença de Brown Boveri, Cie.*
CALDEIRAS A VAPOR	*Projecto e fabrico segundo licença de Foster Wheeler, Co.*
EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS	

CONSTRUÇÕES METALOMECANICAS **MAGUE** S.A.R.L

ALVERCA DO RIBATEJO — PORTUGAL

SIEMENS

4 68 022 8

Peça catálogos ou esclarecimentos à Secção Técnica da

SIEMENS-COMPANHIA DE ELECTRICIDADE, S. A. R. L.

LISBOA-1: AV. ALMIRANTE REIS, 65 — TEL. 53 69 21 • PORTO: R. DAS CARMELITAS, 26-2.º — TEL. 2 89 43

veis dos fluidos no sub-solo. Como exemplo, as regras seguintes: abundantes caudais de água a temperatura inferior ao ponto de ebulição indicam geralmente um baixo gradiente térmico e por isso não é provável uma boa produção de fluidos motores mesmo em poços profundos, mas se as descargas são pequenas é de admitir uma fraca permeabilidade das camadas rochosas — o que provoca na água um arrefecimento por condução — e então é possível encontrar temperaturas muito mais elevadas em profundidade; a associação de nascentes termais a cerca de 100 °C com intenso escape de vapor, prova a existência de águas subterrâneas a temperaturas de ebulição que se vaporizam parcialmente por expansão, ao atingir zonas mais próximas da superfície. Como consequência, quanto maior for a proporção de energia transportada no vapor sobre a transportada na água, mais elevadas serão as temperaturas a que os fluidos se encontram nos reservatórios produtivos — o que se verificou nas regiões de Wairakei e Waiotapu (Nova Zelândia) onde as temperaturas máximas medidas em poços foram respectivamente de 266° e 295 °C (HEALY, 1964).

Exigências de maior refinamento nas prospecções, têm levado alguns investigadores a definir conceitos de fundamental importância na predicção das condições físico-químicas dos fluidos de áreas termais. BODVARSSON & PALMASON (1964) partindo de considerações teóricas e da observação de que as águas que circulam no sub-solo das zonas hidrotermais da Islândia adquiriram a sua temperatura a cerca de 2000 metros de profundidade ([1]), nível-base de circulação, calculam a «temperatura-base», introduzindo simplificações na equação geral de transporte do calor. Assim, considerando que não há geração nem dissipação de calor nas camadas rochosas mais perto da superfície, a expressão matemática da lei da conservação de energia pode escrever-se (KNUDSEN & KATZ, 1958, p 356)

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k}{C_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad [2.1]$$

([1]) Profundidade média que os mantos permeáveis de basaltos atingem (BODVARSSON, 1964).

que nos dá o valor da temperatura T em função de x, y, z e t. Em regime estacionário e supondo que a subida dos fluidos se faz verticalmente (velocidade V_x) através de uma formação rochosa homogénea (permeabilidade e condutibilidade térmica k constantes) e com um débito de massa uniforme numa grande área, os termos convectivo e de condução de [2.1] reduzem-se a $V_x \cdot dT/dx$ e $k/C_p \rho \cdot d^2T/dx^2$ respectivamente. A equação, representando x a profundidade, terá uma forma muito mais simplificada:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{C_p \rho V_x}{k} \frac{dT}{dx} = 0 \quad [2.2]$$

onde C_p é o calor específico a pressão constante dum fluido de densidade ρ.

Nas condições $T = T_0$ (temperatura-base) para $x = D$ (profundidade-base de circulação) obtém-se a seguinte solução:

$$T = T_0 \frac{1 - e^{-(C_p \rho V_x/k)\, x}}{1 - e^{-(C_p \rho V_x/k)\, D}} \quad [2.3]$$

Em geral a profundidade-base D é muito grande (cerca de 2000 metros) e então o denominador tem um valor próximo da unidade. Finalmente, com as simplificações introduzidas, a relação entre a temperatura e a profundidade virá

$$T = T_0 \left[1 - e^{-(C_p\, m/k)\, x}\right] \quad [2.4]$$

onde $m = \rho V_x$ é, evidentemente, o débito de massa por unidade de superfície. A expressão anterior tem tido utilidade prática na definição da temperatura-base das áreas hidrotermais: na Islândia foi possível identificar dois tipos de actividade geotérmica distintos, um deles correspondendo a uma temperatura-base de 150 °C, o outro com um máximo de 230 °C (BODVARSSON, 1964).

Embora a mais importante propriedade de uma fonte de energia geotérmica, o calor, não possa ser apreciada apenas por processos químicos, estes fornecem por vezes indicações de incalculável valor sobre a origem e o movimento dos fluidos hidrotermais, assim como a temperatura a que se encontram no sub-solo. Para começar referiremos uma relação empírica (BODVARSSON &

PALMASON, 1964) que os dados de observação, em áreas geotérmicas da Islândia, permitiram estabelecer entre a temperatura-base dos fluidos e a concentração da sílica neles dissolvida:

$$25 + T_0 = Si\,O_2 \text{ (ppm)} \qquad [2.5]$$

onde T_0 é dada em °C e a quantidade de sílica em partes por milhão. As amostras de basalto dos mantos de lava da Islândia, submetidas a experiências de laboratório, têm comprovado que a solubilidade da sílica nelas contida aumenta de facto cerca de 1 ppm por 1 °C de temperatura da água, o que corresponde aproximadamente à lei de solubilidade das formas cristalinas da sílica — 35 por cento da solubilidade da sílica amorfa pois para esta se tem 70 ppm a 0 °C e 350 ppm a 100 °C (BODVARSSON& PALMASON, 1964; WHITE, 1964).

Acrescente-se ainda que a água saturada de sílica a uma determinada temperatura não a precipita fàcilmente, mesmo que seja arrefecida até temperaturas muito mais baixas; esta propriedade é importante porque garante uma concentração de sílica constante quando a água hipertemal perde o calor por condução ou vaporização, no seu trajecto até à superfície. Deste modo é possível uma estimativa da temperatura mínima a que se encontra a água no nível-base de circulação, apenas fazendo uso do valor máximo dos conteúdos de sílica nas águas das fontes termais; o método tem sido de prática corrente na Islândia e a sua extensão a outras regiões é admissível, onde haja evidência do contacto dos fluidos hidrotermais com mantos de lavas basálticas.

Um outro fenómeno para que os mesmos investigadores islandeses chamam a atenção refere-se à existência de determinados gases na fase de vapor das manifestações superficiais. Tem-se observado que o anidrido carbónico e o ácido sulfídrico estão pràticamente ausentes das nascentes termais, quando a temperatura base de circulação é inferior a 100 °C, devendo a sua presença ser tomada como prova duma temperatura-base superior àquele valor.

Prosseguiremos, ainda no domínio da geoquímica: uma descoberta importante realizada no campo geotérmico de Wairakei foi a de que todos os poços perfurados aí, captaram água cloretada com uma composição química uniforme (ELLIS, 1964). Este facto forneceu uma imediata evidência de que a água pertencia ao mesmo sistema hidrotermal, armazenada em estratos permeáveis a temperatura elevada (200 - 265 °C) e contendo cerca de 0,3 por cento de cloreto de sódio além de muitos outros constituintes em menores proporções. Se todas as manifestações à superfície derivassem daquele reservatório de águas cloretadas, seria possível estimar as suas características a partir de análises químicas feitas às águas das nascentes termais. Vimos na secção 1.2 que, embora os vários de águas termais possam derivar de um único manancial aquífero, as suas propriedades físicas e composição à superfície mascaram muitas vezes a sua origem comum. Se o motivo residir apenas na diluição com água superficial é muito fácil eliminá-lo, determinando as razões moleculares de dois elementos — geralmente o cloro para os aniões e o sódio para os catiões. Comparadas então as razões moleculares relativas a grande número de nascentes termais e às das águas extraídas dos poços da mesma região, foram encontradas concordâncias notáveis (WILSON, 1964). Claro que os dados referentes a nascentes ácidas sulfatadas são de pouca utilidade e os das águas de mistura cloretadas-sulfatadas devem ser usados com reserva; só as razões moleculares das nascentes cloretadas são representativas do sistema hidrotermal da água em estudo. Mesmo assim alguns autores (WILSON, 1964) evitam comparar as razões moleculares quando as concentrações do cloro ou do sódio são muito diferentes, pois não é de esperar nestas circunstâncias grande concordância. Preferem usar o «índice químico» sob forma fraccionária, em que o numerador é a concentração do cloro (ou sódio) em moles por milhão e o denominador é a razão molecular do cloro (ou sódio) para os outros aniões (ou catiões); só os denominadores serão comparados e a sua uniformidade ressaltará em todas as águas de composição semelhante, independentemente de pequenas flutuações nas concentrações absolutas. Os numeradores dos «índices químicos» evidenciam os casos em que as concentrações do cloro ou do sódio diferem apreciàvelmente.

Sistema hidrotermais do tipo encontrado na Nova Zelândia (Wairakei, Waiotapu e Kawerau) são comuns a muitas regiões do globo como o Japão, Kamchatka e Islândia e por isso as análises químicas da água e vapor superficiais

serão de muito interesse para o estudo de qualquer novo campo geotérmico, tanto na predição das características dos fluidos a extrair como até na escolha da melhor localização dos furos.

As razões moleculares que é hábito extrair das análises químicas das águas termais são as seguintes: Cl/HBO_2 Cl/F, Cl/As, Cl/SO_4, Na/k, Na/Li, Na/Ca, Na/Mg e sendo possível ainda Cl/Ba, Cl/I, Na/Rb e Na/Cs. O cálculo destes valores permite averiguar se existe um conjunto característico para cada área termal. A experiência em Wairakei mostrou que as razões Cl/B, Cl/F, Cl/As, Cl/Br, Cl/SO_4 e Na/Li apresentam uma notável uniformidade em numerosas nascentes, provando a existência de um único reservatório profundo de águas cloretadas. Também se concluiu que, no caso de uma área hidrotermal ter à superfície vários centros de actividade, será aconselhável escolher para perfuração os locais em que a razão Na/K apresenta valores mais baixos, por serem os que se presume em comunicação mais directa com o manancial subterrâneo.

Em princípio devem evitar-se as áreas onde a investigação geoquímica pareça indicar que diferentes tipos de água brotam à superfície.

Finalmente, as análises feitas em amostras de gases colhidas nas fumarolas e nas bacias de água em ebulição ou lamas quentes também são muito úteis, porque fornecem possibilidade de distinguir se o vapor é de origem magmática directa ou «secundário», isto é, vapor fluindo duma toalha profunda de água cloretada. No primeiro caso a percentagem de gases no vapor é constante e elevada (2-3 por cento em volume); no segundo a percentagem é menor e variável. As razões moleculares CO_2/SH_2 e CO_2/NH_3 dão igualmente um índice dessa variação.

3. ACTIVIDADE HIDROTERMAL NAS FURNAS (S. MIGUEL)

O complexo vulcânico das Furnas teria sido formado em três estágios eruptivos (CASTELLO BRANCO & al., 1957). No primeiro foi edificado o aparelho vulcânico principal, de grandes dimensões. Na segunda fase surge a caldeira (cerca de 6 km de diâmetro), pelo abatimento do edifício primitivo; nesta altura o vulcanismo reduz-se à presença de fontes termais e de emanações fumarólicas, tanto no interior como no exterior da caldeira. A terceira fase eruptiva foi assinalada pela formação de cones secundários no fundo da caldeira, como os picos das Marcondas, do Gaspar (onde em 1630 houve uma erupção) e do Diogo Preto. Actualmente, as manifestações secundárias aparecem na periferia deste maciço mais recente, segundo uma linha curva com uma das extremidades localizada no bordo nordeste da lagoa das Furnas e a outra na ribeira dos Tambores, junto da central eléctrica; existem ainda fumarolas ao longo do troço inferior do mesmo curso de água e perto do mar, na Ribeira Quente: estas, no entanto, estariam em relação com filões basálticos e traquíticos recentes do exterior da caldeira principal. No esboço topográfico da região das Furnas ([1]) assinala-se a situação das principais áreas de alteração hidrotermal do terreno correspondentes aos diversos centros de actividade fumarólica assim como as posições aproximadas das principais nascentes termais.

Também se apresenta uma ampliação do esboço topográfico na zona activa mais importante — as «caldeiras» das Furnas.

É nesse recinto que se situam, além de um numeroso conjunto de fumarolas e solfataras de várias dimensões, as nascentes de águas termais com temperaturas mais elevadas, próximas dos 100°C. De salientar, a existência de águas frias — Água Azeda, Chalet Frio, Miguel Henriques e Água Prata — no interior do mesmo círculo, de raio aproximado a 100 metros, que limita as manifestações hipertermais.

A menos de 200 metros a sul do grupo das «caldeiras» encontra-se um estabelecimento termal e nas suas imediações um novo grupo de nascentes — Quenturas, Grutinha I, Grutinha II, Torno e Morangueira. Ao longo da Avenida Manuel de Arriaga, que do estabelecimento termal se dirige para oeste, existem mais algumas nascentes termais que lançam os seus caudais, como todas as outras, na ribeira das «Águas Quentes». A ribeira aumenta muito a sua termalidade à custa das «caldeiras» e do grupo da Avenida Manuel

([1]) Ver anexos — O esboço foi desenhado utilizando como base a carta geológica de S. Miguel (escala 1 : 50 000 — folha B) levantada pela «Missão Geológica dos Açores» (1951-58) e como auxiliar a carta da freguesia das Furnas (escala 1 : 2000) da Direcção de Obras Públicas da Junta Geral do Distrito de Ponta Delgada.

de Arriaga, mas ela já transportava águas termais das nascentes do Sanguinhal (a sudoeste das Furnas) e dos Cabaços (a oeste), onde é feita a captação da água que alimenta a piscina do parque «Terra Nostra».

Por último temos as águas quentes das pequenas bacias situadas na área de emanações de vapor, junto da lagoa das Furnas e para a qual escoam os seus pequenos caudais.

As temperaturas de todas estas fumarolas e nascentes têm sido medidas por diversos autores (cf. CHAVES, 1906; AGOSTINHO, 1937).

Contudo, de todos os estudos que podem permitir uma ideia sobre o valor económico da região como fonte de energia e suas possibilidades de exploração, os melhores elementos de que dispomos são as análises químicas referentes a algumas nascentes termais e frias, executadas por Fouqué, Lepierre e Herculano de Carvalho respectivamente em 1872, 1912 e 1953, e de análises dos gases das fumarolas, executadas por M. Palha em 1953.

Um exame do quadro II [1], onde se apresentam os resultados dos primeiros trabalhos, mostra por um lado a necessidade da extensão de análises completas a todas as nascentes e por outro a da actualização frequente das observações; com efeito, a partir de análises distanciadas de períodos de tempo tão dilatados é difícil inferir se alguns dados dispares são resultantes duma evolução real das características dos fluidos ou se derivam dum aperfeiçoamento nos métodos de análise e interpretação. Como exemplo, H. DE CARVALHO (1955, p 136) afirma, e contràriamente ao que FOUQUÉ (1873) e LEPIERRE (1917) tinham suposto, não ter encontrado em nenhuma das águas das Furnas o ião carbonato ($CO_3^{=}$); e dá como explicação a impossibilidade do bicarbonato se decompor ($2\ CO_3H^{-} \rightarrow CO_3^{=} + CO_2 + OH_2$), devido à presença do gás carbónico (CO_2) a pressão elevada.

Dediquemos um pouco mais de atenção a essa afirmação: na verdade, a existência de uma atmosfera de anidrido carbónico é constante na fase gasosa de todas as águas termais das Furnas (ver quadro II) e nas nascentes frias há mesmo sobressaturação daquele gás. Mas o facto de não haver precipitação de carbonatos na descarga natural das nascentes não é garantia de igual comportamento quando a mesma água é captada a níveis profundos; com efeito, se a água a temperatura e pressão elevadas é submetida a uma expansão brusca, grande parte do anidrido carbónico é arrastada no vapor que se forma, tornando possível a transformação do bicarbonato e consequente precipitação da calcite (CO_3Ca), desde que as águas contenham cálcio. Estas considerações são de grande importância na perspectiva do aproveitamento do vapor em poços profundos, pois a precipitação da calcite acarreta graves problemas para a manutenção dos poços e condutas; o que levou ELLIS (1964) a estudar as condições de precipitação em função dos teores de cálcio e bicarbonato e da pressão parcial do anidrido carbónico.

Outros depósitos que provocam sérios prejuízos derivam das altas concentrações de sílica (SiO_2). Contudo só começam a revelar-se francamente prejudiciais quando as quantidades de sílica ultrapassam as 350 ppm, que é exactamente o limite máximo encontrado nas águas termais das Furnas; por isso não são de esperar complicações de grande monta.

Apesar dos resultados das análises químicas serem imcompletos, demoremo-nos mais algum tempo na sua apreciação. No Quadro II encontramos apenas uma nascente com pH compreendido entre 2 e 5 e ausência total do ião bicarbonato, situada na margem da lagoa das Furnas a uma altitude sensìvelmente superior à de todas as outras águas bicarbonatadas. O seu pequeno caudal e a abundância de emanações de vapor sugerem que a água não é de origem subterrânea, mas formada parcialmente por condensação; a sua concentração de sulfato ($SO_4^{=}$) — a maior da região das Furnas, com a única excepção da «caldeira» do Asmodeu — é decerto proveniente da oxidação superficial do ácido sulfídrico transportado no vapor. Nesta área de vapores ácidos, a água contém mais de 50 ppm de cloro o que é suficiente para afastar a hipótese de se encontrar vapor sobreaquecido, mesmo em profundidade; nas outras nascentes bicarbonatadas os conteúdos de cloro são em geral maiores, variando de um máximo de 300 ppm a um mínimo de pouco mais de 30 ppm. Assim, e dada a relativa abundância de cloro em todas as águas da região, somos levados a concluir que é muito mais provável a existência de um manancial aquífero

[1] Ver anexos.

profundo de águas cloretadas do que um reservatório vaporífero «seco».

No entanto, esse reservatório de águas cloretadas não terá acesso directo à superfície, pois neste caso as razões moleculares Cl/aniões e Na/catiões apresentariam uniformidade para todas as nascentes; ora o cálculo dessas razões moleculares evidencia imediatamente a ausência de tal uniformidade. Por outro lado, os baixos valores das razões Cl/HCO_3 sugerem que as nascentes terão origem numa toalha pouco profunda de águas bicarbonatadas; as suas variadas temperaturas e mineralizações estariam então dependentes da quantidade de vapor vulcânico, contendo anidrido carbónico e ácido sulfídrico, além de outros gases, que se misturou com água meteórica de infiltração recente. É natural que, onde foi mais fácil o acesso do vapor vulcânico, à superfície por melhores condições de permeabilidade ou fracturação do sub-solo, apareçam águas de maior riqueza mineral e também de mais elevadas temperaturas na emergência.

Outras razões moleculares anormalmente baixas são a Cl/SO_4, parecendo comprovar que em geral existe alguma oxidação superficial do ácido sulfídrico transportado no vapor, e as razões Cl/HBO_2 e Cl/F. É costume explicar os valores baixos da primeira destas pelo transporte do ácido bórico no vapor. Quanto à razão Cl/F, que apresenta valores superiores a 100 em quase todas as águas termais da Nova Zelândia (WILSON, 1964), tem nas águas das Furnas valores inferiores a 20; LLOYD (1963) presume que o flúor tende a substituir o cloro nas emanações vulcânicas gasosas e portanto o aparecimento de águas fluoretadas nas Furnas estará associado à existência de vapor, fonte principal do calor que recebem.

Do que acima se tem dito parece ser aceitável extrair a conclusão de que todas as águas da área menos elevada da caldeira vulcânica — o «vale» das Furnas, como é conhecido — são de origem meteórica, infiltrando-se no terreno até uma profundidade relativamente pequena, e aí, são aquecidas e misturadas com vapor que fluirá de maiores profundidades. Em contrapartida, as nascentes termais da lagoa não estarão em relação com a toalha de águas bicarbonatadas do «vale», por se encontrarem fora da principal bacia de captação de águas meteóricas e a uma maior altitude, o que pode constituir uma achega a favor da escolha deste local para início das perfurações, pois os poços abertos no «vale» podem intersectar a toalha de águas bicarbonatadas com prejuízo dos caudais das nascentes mínero-medicinais, e sem grande vantagem para a produção de energia geotérmica, devido à temperatura relativamente baixa a que se encontram e à possibilidade da precipitação da calcite nos poços de captação.

Em relação ao estudo dos gases nas fumarolas das Furnas, apenas conseguimos obter os resultados do Quadro III onde se indica a percentagem, em volume, de cada um dos elementos na mistura gasosa transportada no vapor. Não temos nenhuma indicação sobre o teor desta mistura em relação à quantidade total das emanações, que seria útil para definir a origem do vapor — «secundária» ou juvenil.

As análises apresentadas mostram que os gases naturais se reduzem pràticamente ao anidrido carbónico. A pequena percentagem com que os outros constituintes participam, nomeadamente o ácido sulfídrico, é muitas vezes encarada como prova de uma decadência na actividade vulcânica. No entanto, sempre que o vapor atinge a superfície depois de efectuar um grande trajecto, é normal encontrar-se um valor muito alto para a razão molecular CO_2/SH_2: primeiro, porque o ácido sulfídrico é muito mais solúvel, na água a qualquer temperatura, do que o anidrido carbónico; em segundo lugar, porque a formação dos compostos de ferro se faz geralmente à custa do ácido sulfídrico contido na mistura gasosa.

Faremos, para terminar, uma referência aos conteúdos de sílica das águas minerais que brotam naturalmente na região das Furnas. Na fig. 3 estão assinaladas as concentrações de sílica dessas águas em função das suas temperaturas à emergência; é imediata a constatação de que as ordenadas se escalonam ao longo da curva (I), que representa a lei da solubilidade da sílica amorfa (BODVARSSON & PALMASON, 1964; WHITE, 1964). Os dois desvios mais flagrantes observam-se nas nascentes termais do «Caldeirão» e da área da lagoa. A origem desta última nascente, cujas águas só serão aquecidas à superfície pelo vapor das sulfataras, explica que o conteúdo de sílica esteja muito aquém da saturação, em virtude do pouco contacto das águas termais com as rochas; quanto à nascente do «Caldeirão», a sua baixa mineralização é evidente, em confronto com as

outras águas hipertermais, o que pode estar relacionada com alguma particularidade no processo de captação. Nas restantes águas há portanto fortes indícios de saturação, e o facto de seguirem aproximadamente a lei da solubilidade da sílica amorfa leva a suspeitar que não terão estado a temperatura muito superior à que apresentam na emergência; de contrário, a sílica dissolvida seria mais representativa das temperaturas de água hipertermal profunda, como vimos acima. A conclusão a tirar corrobora a afirmação já feita: as águas termais das Furnas, pelo menos as situadas no «vale», terão origem numa toalha pouco profunda aquecida pelo vapor vulcânico.

4. PLANEAMENTO DOS TRABALHOS PRELIMINARES DE PROSPECÇÃO NA ÁREA DAS FURNAS

Consideramos que todos os trabalhos a executar deverão ter como base estudos geológicos de pormenor, em particular no tocante à «estratigrafia» da região, ao relevo estrutural e ao sistema de falhas e fracturas que condiciona o movimento dos fluidos hidrotermais. Um levantamento topográfico na escala 1 : 10 000 com uma cobertura aérea de fotografias zenitais e oblíquas, dará suficiente apoio à cartografia geológica. Alguns métodos de prospecção geofísica podem provar o seu préstimo no conhecimento da estrutura geológica, nomeadamente na descoberta de estratos favoráveis à acumulação de vapor e água hipertermais: referímo-nos aos levantamentos geomagnéticos, gravimétricos, geoeléctricos e sísmicos, pelos quais é possível medir vários parâmetros físicos das formações rochosas — respectivamente, a susceptilidade magnética, a densidade, a condutibilidade eléctrica e a velocidade de propagação das ondas elásticas. Os dois primeiros tipos de observações são pràticamente exequíveis, porquanto o Serviço Meteorológico Nacional tem instaladas estações permanentes de registo do campo geomagnético (Observatório Magnético de S. Miguel) e das marés terrestes (estação gravimétrica do Observatório «Afonso Chaves») que permitem as reduções necessárias aos levantamentos; medidas geoelétricas são igualmente viáveis pois o S.M.N. tem disponibilidade de material para as fazer; quanto à prospecção sísmica não julgamos fácil a sua execução, por não se dispor no momento dos instrumentos adequados e a sua aquisição ser muito dispendiosa.

Indicamos em seguida uma série de observações de superfície que podem ser iniciadas em breve e donde se espera tirar conclusões quanto às possibilidades de aproveitamento energético do sistema hidrotermal das Furnas, como foi exposto na secção 2.

a) Instalação duma estação base de medidas termo-udométricas

Durante as fases da prospecção geotérmica será necessário o apoio duma estação fixa, de modo a possibilitar a redução das medidas de campo a uma mesma época ou a determinar os valores normais da temperatura do ar, precipitação, etc., que interessam à estimativa dos débitos de calor e de massa do sistema hidrotermal. Para instalar o parque de instrumentos deve ser escolhido um local representativo das condições climáticas da área em estudo, mas suficientemente afastado dos centros de actividade termal de forma que as medidas estejam isentas de perturbações devidas aos fluxos de calor anómalos ([1]).

Serão tomadas temperaturas do ar e do solo a 15 cm, 1 e 2 metros (nas leituras a 1 metro de profundidade devem utilizar-se simultâneamente termómetros de mercúrio e pares termo-eléctricos); para observar as variações diárias e estacionais também se instalarão dois termógrafos de registo contínuo das temperaturas do ar e do sub-solo a 1 metro de profundidade. A precipitação será medida diàriamente assim como a evaporação e é conveniente que as leituras das temperaturas sejam feitas duas vezes por dia.

b) Levantamento de temperaturas no sub-solo

A experiência em zonas geotérmicas da Nova Zelândia tem provado que a densidade de 50 estações/km^2 dá suficiente cobertura à execução dos levantamentos de temperatura a 1 metro de profundidade. No caso das Furnas, cuja área de prospecção é da ordem dos 30 km^2, terão que ser feitas cerca de 1500 observações. É dispensável usar de grande rigor na distribuição regular das estações, pois os resultados preliminares

([1]) Ver em esboço topográfico o local assinalado por B.

irão ditando onde for necessário concentrar ou rarefazer as medidas; em média, as estações serão espaçadas de 50 a 60 metros, ao longo de linhas naturais de levantamento. Em determinadas zonas surgirá certamente a necessidade de completar as observações utilizando linhas adicionais de levantamento, mas a existência de uma carta topográfica actualizada (escala 1:10 000) limitará substancialmente esse trabalho.

Os instrumentos e técnicas de observação serão os que se indicou em 2.1.

c) Medição dos débitos de calor

O trabalho de prospecção que consideraremos em seguida é o das estimativas do calor dissipado naturalmente na área delimitada pelo levantamento anterior.

Nas medidas dos fluxos de calor de condução e convecção através do solo, das emanações de vapor das fumarolas e de evaporação e radiação das superfícies de água quente usaremos as normas e os instrumentos referidos no parágrafo 2.2.

No cálculo das perdas de calor nas descargas de água termal julgamos aconselhável o seguinte procedimento: medir mensalmente os caudais e temperaturas à emergência de todas as nascentes com águas a temperatura superior à média do ar na região das Furnas [1]; observar, pelo menos uma vez por semana, os caudais e temperaturas dos cursos de água nos locais assinalados por F_1, F_2, F_3 e Q no esboço topográfico. A primeira série de medidas permitirá estimar o débito de calor das descargas visíveis da água termal e o débito de massa correspondente; e denunciar quaisquer influências da precipitação nos seus caudais. As observações nos cursos de água darão conta da descarga total (de nascentes visíveis e invisíveis) e do calor dissipado pelas águas termais na bacia hidrográfica do vale das Furnas. No troço do curso de água principal compreendido entre o ponto Q e a foz não são de aconselhar medidas de caudais, devido à grande afluência de águas frias que aí se observa; teremos que nos contentar com medições individuais das nascentes que drenam águas quentes para a referida ribeira.

d) Análises químicas dos fluidos hidrotermais

Vimos acima a importância de que se reveste a análise química das águas termais na predição das características dos fluidos acumulados no sub-solo. Não admira que insistamos, ao classificar como trabalho fundamental da prospecção geotérmica na região das Furnas a execução de análises completas de todas as nascentes e das emanações gasosas — reconhecimento das proporções dos gases constituintes e da percentagem dos mesmos em relação ao vapor de água com que se misturam.

A análise química das águas das ribeiras constitui um método eficaz para definir a contribuição de água quente nos seus caudais, especialmente nos troços onde não se farão outras medidas hidrológicas; convirá colher amostras em vários locais dos cursos de água a analisá-las. As concentrações de sílica dessas amostras talvez forneçam indicações de utilidade, na hipótese aceitável de que as águas termais das Furnas satisfazem com bastante aproximação a lei da solubilidade da sílica amorfa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Cabe agora pôr a seguinte questão: em face da experiência adquirida noutras regiões e dos conhecimentos actuais de vulcanologia, haverá elementos para nos pronunciarmos «a priori» sobre a rentabilidade do aproveitamento da energia geotérmica nos Açores, particularmente na região das Furnas? Em primeiro lugar discutiremos a falta de rigor da designação «energia geotérmica»: potencialmente, esta forma de energia está disponível em qualquer lugar do globo; mesmo com um gradiente de temperatura normal (30 °C/km), a estimativa do calor contido nas rochas da crosta até 7,5 quilómetros de profundidade conduziu a um total equivalente a 7500 megawatts × ano por quilómetro quadrado. Por ora, essa enorme reserva não foi ainda explorada, pois existem algumas dificuldades teóricas a superar e grande retracção a investimentos tão avultados; apenas se tem lançado mão do calor transportado pelos fluidos hidrotermais em certas regiões de natureza vulcânica, razão por que é

(1) Convém medir igualmente os caudais das nascentes frias para descontá-los ao aumento de caudal verificado nos cursos de água e que é proveniente tanto das fontes quentes como das frias.

mais correcto classificar de «energia hidrotermal» aquela que na realidade está a ser captada no sub-solo da Nova Zelândia, Itália, Califórnia, Islândia, etc.

Voltemos à questão posta inicialmente, apresentando-a agora com outro aspecto: será de admitir a possibilidade de aproveitamentos hidrotermais em todas as regiões vulcânicas ou há alguma regra que a restrinja a determinado tipo de vulcanismo? Na verdade, BANWELL (1967) sugere com bastante fundamento que é nas zonas do tipo Pacífico, onde o calor dissipado pela actividade hidrotermal é muito superior ao libertado pelas erupções vulcânicas (pelo menos de 10:1), que se deve esperar condições para explorar a energia de origem hidrotermal. O facto pode explicar-se pela própria natureza, geralmente explosiva, das erupções de lavas ácidas características dos arcos insulares e margens continentais do oceano Pacífico; pouco a pouco, as cinzas e os fragmentos rochosos das explosões vão depositando, até formar uma camada permeável muito espessa, pela qual as águas subterrâneas circulam fàcilmente. Em contrapartida, os vulcões da série Atlântica — em que são integrados os de Hawai, do oceano Pacífico central — caracterizam-se por abundante efusão de lavas básicas e muito fraca actividade hidrotermal.

É neste último tipo vulcânico que BANWELL (1967) inclui os Açores; e as estimativas que arrisca, com referência ao calor libertado pelas erupções históricas e pela actividade hidrotermal, dão valores muito baixos para a energia dissipada à superfície. Com efeito, se considerarmos que as 18 erupções conhecidas, desde 1440 (Sete Cidades — S. Miguel) a 1957 (Capelinhos Faial), libertaram em média 4×10^{21} ergs — energia estimada da última erupção (MACHADO & al, 1962) verificamos que nos últimos 500 anos a produção natural de calor atinge cerca de $1{,}7 \times 10^{15}$ kcal, se não contarmos com as perdas dos sistemas hidrotermais. Assim, o fluxo de calor de origem vulcânica repartido pela superfície total das terras emersas e submersas da plataforma açoriana (cerca de 200 000 km²) teria um valor tão insignificante que não alteraria substàncialmente o fluxo normal, já que as manifestações hidrotermais conhecidas se circunscrevem a três ou quatro zonas de pequena extensão.

O que acima se diz, com base na citada exposição de Banwell, justificaria uma atitude de reserva quanto ao aproveitamento de energia hidrotermal nos Açores. Vamos porém focar o problema de um ponto de vista diferente.

As 18 erupções assinaladas no período histórico da vida do arquipélago representam certamente apenas uma percentagem da energia total dissipada, pois grande parte delas se terá localizado mais longe das ilhas e sem o conhecimento da população — consulte-se por exemplo (CHAVES 1915), que dá notícia, entre Maio de 1902 e Março de 1915, de 7 quebras dos cabos submarinos sendo 5 delas, pelo menos, provocadas por fenómenos vulcânicos ou hidrotermais. Em face da dificuldade evidente em sabermos com segurança quantas erupções ou outros fenómenos de vulcanismo se processaram ou persistem em toda a região dos Açores, julgamos mais acertado rever as estimativas de Banwell considerando apenas uma área limitada (Ilha de S. Miguel e imediações) onde dificilmente teria passado despercebido qualquer fenómeno vulcânico.

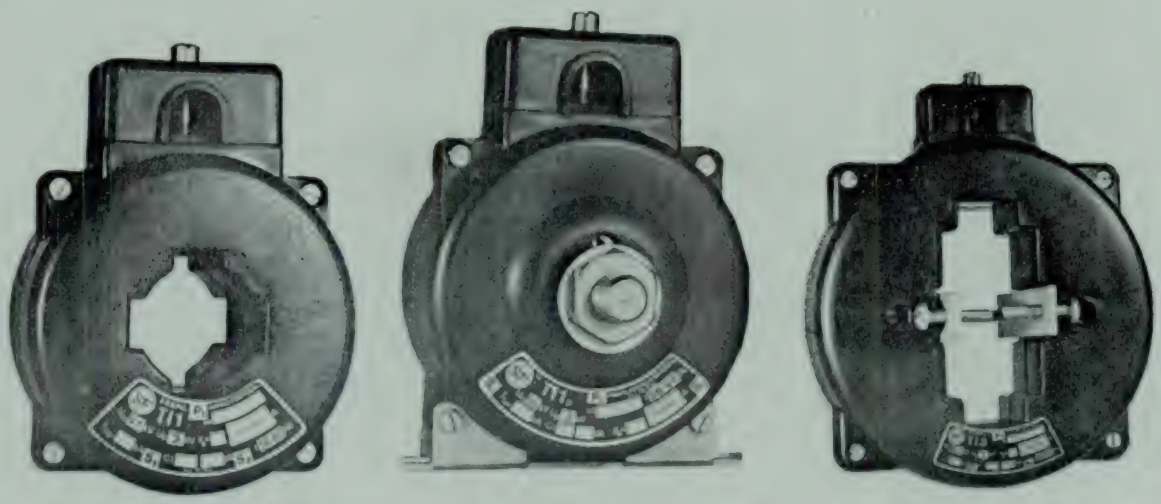
No mesmo período histórico de cerca de 500 anos houve em S. Miguel ou junto das suas costas 8 erupções (MACHADO, 1958). Continuando a supor que a energia libertada em cada uma delas foi idêntica à dos Capelinhos (1957–58) teremos um total de $0{,}75 \times 10^{15}$ kcal, que corresponderá a um débito da ordem de 5×10^{4} kcal/s. A produção natural de calor proveniente das lavas dos vulcões Ngauruhoe e Ruapehu e de outras erupções explosivas (Ilha do Norte — Nova Zelândia) durante os últimos 10 000 anos, pode ser estimada em 10^{5} kcal/s; observando que a zona vulcânica da Ilha do Norte tem uma superfície aproximada de 8000 km² e a ilha de S. Miguel anda por volta de 800 km², a comparação entre os dois fluxos mostrará um valor mais elevado para o de S. Miguel.

Claro que é talvez pertinente objectar: enquanto na Nova Zelândia o débito de calor de origem hidrotermal é de 10^{6} kcal/s (10 vezes superior ao de origem vulcânica), em S. Miguel, o tipo de vulcanismo, que não é essencialmente ácido, com dificuldade permitirá a acumulação de importantes mananciais de água e vapor. Não temos infelizmente nenhuma base segura que nos habilite a responder a esta objecção, pois não existem elementos sobre os centros activos hidrotermais da ilha. No entanto gostaríamos de adiantar mais algumas considerações, de certo modo justificativas do interesse em ver iniciados

FRAPIL

CONSTRUÇÕES E MONTAGENS ELÉCTRICAS

SARL



transformadores de intensidade

—baixa tensão—

núcleo magnético toroidal • perdas extra-reduzidas • vasta gama de utilizações

caixas de polipropileno antichoque

licença

SACI

SEDE E INSTALAÇÕES FABRIS

CAIS DE SÃO ROQUE
APARTADO 20
TELEFONE 23071 2
AVEIRO

DELEGAÇÃO NO SUL

RUA CASTILHO
38, r/c.-dt.
TELEFONE 5 25 28
LISBOA-1

042.71:2575

FILTROS TECIDOS

PARA GAZES E LÍQUIDOS
EM PEÇAS, PANOS, MANGAS OU SACOS

DE QUALQUER FIBRA NATURAL OU SINTÉTICA

FANAFEL

FÁBRICA NACIONAL DE FELTROS INDUSTRIAIS
SOCIEDADE LIMITADA

APART.: 9
TELEFS.: 52091 PBX
TELEG.: FELTROS

OVAR
PORTUGAL

ESCRITÓRIO E FÁBRICA
ESTRADA DE S. JOÃO

Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações, L.da

(SONDADORA)

SONDAGENS geológicas e geotécnicas — CAPTAÇÕES de águas subterrâneas — REBAIXAMENTOS do nível freático — CONSOLIDAÇÕES E ESTABILIZAÇÃO do solo — INJECÇÕES DE CIMENTO e outros produtos — INFRAESTRUTURAS de barragens, túneis e pontes — FUNDAÇÕES de todos os tipos

Única Empresa da especialidade com sede no Ultramar Português

DELEGAÇÃO - LISBOA
R.S.Pedro de Alcântara, 1
Tel. 32 46 93 e 21 32 56

SEDE - LUANDA
Rua Serpa Pinto, 60
C.P.2178 - Tel.4226

MOÇAMBIQUE
L.Marques - C.P.982 - Tel.741121
Beira - C.P. 1002 - Tel. 71497

os trabalhos de prospecção para aproveitamento da energia hidrotermal.

a) Na tábua 3 do artigo de Banwell são apresentados valores do débito de calor de alguns sistemas hidrotermais já estudados na Nova Zelândia, Islândia e E. U. A.. Num total de 1 458 180 kcal/s, a Islândia tem à sua parte 1 100 000 kcal/s. O facto é muito significativo pois esta ilha não pertence à série do Pacífico, mas sim a uma categoria intermédia em que o tipo de vulcanismo tem uma feição derivada da enorme efusão de lavas básicas (basaltos) e simultâneamente da existência de filões vulcânicos associados às nascentes termais.

b) Não será igualmente muito precisa a classificação do vulcanismo açoriano como do tipo Atlântico. FRIEDLAENDER (1931) refere-se à longa história de alguns vulcões ácidos dos Açores e fenómenos peculiares a esses vulcões são de facto conhecidos: junto das caldeiras das ilhas do arquipélago abundam geralmente as camadas de pedra pomes e cinzas, por vezes aglutinadas em tufos, que devem corresponder a erupções muito explosivas (MACHADO, 1957); o pico de Bodes 1.°, situado na região das Furnas, é uma agulha «peleana» de traquito; no vale da ribeira dos Tambores, que corre na mesma região, nota-se a presença de mantos de lava e filões traquíticos; os andesitos também são conhecidos em vários locais, particularmente em S. Miguel; na escarpa situada a oeste da lagoa das Furnas, ZBYSZEWSKI (1961, pp 32-3) encontra a seguinte sequência — materiais de projecção modernos, traquitos, projecções de pedra pomes, andesitos, projecções de pedra pomes, lava traquítica.

c) A ilha de S. Miguel tem uma população de cerca de 170 000 habitantes que consome a energia eléctrica produzida por uma central térmica de 4500 kilowatts e alguns pequenos aproveitamentos hidráulicos com um total de 2570 kilowatts. Qualquer acréscimo à potência existente, por modesto que seja, desde que o custo da instalação se revele económico, será de grande ajuda, principalmente à sua indústria incipiente. No excelente artigo de Banwell também se apresenta uma lista das aplicações de calor dos sistemas hidrotermais, mesmo daqueles em que as baixas pressões e temperaturas (80-150°C) não consentem bons rendimentos na produção de electricidade. Algumas delas seriam de grande interesse para a economia de S. Miguel.

AGRADECIMENTOS

Ao Eng.° Frederico Machado, da Junta de Investigações do Ultramar, agradeço a leitura atenta do manuscrito e as sugestões apresentadas.

REFERÊNCIAS

— Agostinho, J. (1937). «Volcanic activity in the Azores, Report for 1933-1936». Bull. Volcanol., tomo II, pp 183-192.

— Banwell, C.J. (1964). «Geothermal drillholes: physical investigations». Proc. of the UN Conf. on New Sources of Energy, Volume 2, pp 60-72.

— Banwell, C.J. (1967). «L'energie geothermique». Impact, Science et Société, Vol XVII, n.° 2 pp 159-179.

— Benseman, R.F. (1959). «The calorimetry of steaming ground in thermal areas». J. Geophys Res., Vol 64, pp 123-126.

— Benseman, R.F. (1959-a). «Estimating the total heat output of natural thermal regions». J. Geophys. Res., vol. 64, pp 1057-1062

— Bodvarsson, G. (1964) «Physical characteristics of natural heat resources in Iceland». Proc of the UN Conf of New Sources of Energy, Volume 2, pp 82-90.

— Bodvarsson, G. & G. Palmason (1964). «Exploration of sub-surface temperature in Iceland». Proc of the UN Conf on the New Sources of Energy, Volume 2, pp 91-98.

— Breusse, J.J. (1964). «Contribution des méthodes géophysiques à la prospection des champs géothermiques». Proc. of the UN Conf on New Sources of Energy, Volume 2, pp 141-148.

— Castello Branco, A.; G. Zbyszewski, A. C. Medeiros, & F. M. Almeida (1957). Étude Géologique de la Region de Furnas dans l'Ile de S. Miguel (Açores). Lisboa.

— Chaves, F.A. (1906). «A temperatura das nascentes termais das Furnas na ilha de S. Miguel». Lisboa.

— Chaves, F.A. (1915). Erupções Submarinas nos Açores. Lisboa.

— Craig, H., G. Boato & D.E. White (1956). «The isotopic geochemistry of thermal waters». National Research Council Nuclear Sci., Rept. n.° 19, pp 29-44.

— Decius, L C. (1964). «Geological environment of hyperthermal areas in continental United States and suggested methods of prospecting them for geothermal power». Proc. of the UN Conf of New Sources of Energy, Volume 2, pp 166-178.

— Doyle, D. & F. E. Studt (1964). «Scientific factors in geothermal investigation and exploitation». Proc. of the UN Conf on New Sources of Energy, Volume 2, pp 194-200.

— Ellis, A.J. & S.H. Wilson (1955). «The heat from the Wairakei — Taupo thermal region calculated from the chloride output». N. Zealand J. Sci. Tech. B 36, 6, pp 622-631.

— Ellis, A.J. (1964). «Geothermal drillholes: chemical investigations». Proc. of the UN Conf on the New Sources of Energy, Volume 2, pp 208-218.
— Fisher, R.G. (1964). «Geotermal heat flow at Wairakei during 1958». N. Zealand J. Geol. Geophys., vol 7, pp 172-184.
— Fouqué, F. (1873). Les Eaux Thermales de l'Ile de San-Miguel (Açores). Lisboa.
— Fiedlaender, I. (1931). «Physics of the Earth I — Volcanology». Bull. of the Nat. Res. Council, n.º 77, pp 34-48.
— Healy, J. (1964). «Geology and geothermal energy in the Taupo volcanic zone, New Zealand». Proc of the UN Conf on the New Sources of Energy, Volume 2, pp 250-258.
— Herculano de Carvalho, A. (1955). Estudos Analíticos de Águas Termais. (Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos, Lisboa).
— Hunt, A. M. (1964). «The measurement of borehole discharges, downhole temperatures and pressures, and surface heat flows at Wairakei». Proc of the UN Conf on New Sources of Energy, Volume 3, pp 196-207.
— Knudsen, J. G. & D. L. Katz (1958). Fluid Dynamics and Heat Transfer. (Mcgraw-Hill, New York).
— Lepierre, C. (1917). Análise das Águas Minero-Medicinais do Vale das Furnas, Ilha de S. Miguel, Lisboa.
— Lloyd. E. F. (1963). «Thermal activity at Waiotapu». New Zealand Dept. Sci. Indus. Research, Bull 155, pp 42-49.
— Machado, F. (1957). «Caldeiras vulcânicas dos Açores». Atlântida, vol 1, n.º 5, pp 275-278.
— Machado, F. (1958). «Variação secular do vulcanismo açoriano». Boletim do Núcleo Cultural da Horta, vol 1, pp 225-235.
— Machado, F., W. H. Parsons, A. F. Richards & J. W Mulford, (1962). «Capelinhos eruption of Fayal volcano, Azores, 1957-1958». J. Geophys. Res., vol 67, pp 3519-3529.
— Misener, A. D. & A. E. Beck (1960). «The measurement of heat flow over land». Methods and Techniques in Geophysics, Volume 1, (Interscience Publishers, New York).
— Palacios, J. (1947). Termodinamica Aplicada, Madrid.
— Palha, M. (1953) Estudo da Composição dos Gases Naturais da Ilha de S. Miguel (Açores) Direcção Geral dos Combustíveis (Relatório).
— Robertson, E.I. & G.B. Dawson (1964). «Geothermal heat flow through the soil at Wairake». N Zealand J. of Geol. Geophys, vol 7, pp 134-143.
— Robson, G.R. & P.L. Willmore (1955). «Some heat measurements in west Indian soufrières». Bull. Volcanol., Série II — Tome XVII, pp 13-39.
— Studt, F.E. (1964). «Geophysical prospecting in New Zealand's hidrothermal fields». Proc. of the Un Conf on New Sources of Energy, Volume 2, pp 380-385.
— Thompson, G.E.K.; C.J. Banwell, G.B. Dawson & D.J. Dickinson (1964). «Prospecting of hidrothermal areas of surface thermal surveys». Proc. of the UN Conf of the New Sources of Energy, Volume 2, pp 386-401.
— White, D. E. (1957). «Thermal waters of volcanic origin». Geol Soc. America Bull., V. 68, pp 1637-1658.
— White, D. E. (1964). «Preliminary evaluation of geothermal areas by geochemistry, geology and shallow drilling». Proc of the UN Conf of the New Sources of Energy, Volume 2, pp 402-408.
— Wilson, S. H. (1964). «Chemical prospecting of hot springs areas for utilization of geothermal steam». Proc. of the UN Conf. on New Sources of Energy, Volume 2, pp 410-420
— Zbyszewski, G. (1961). Étude Géologique de l'Ile de S. Miguel (Açores). Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal, Tomo XLV. Lisboa.

ANEXOS

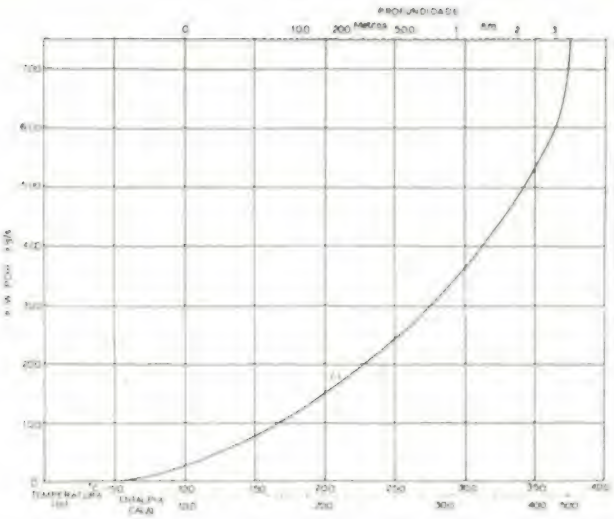


Fig. 1 — Potência dissipada naturalmente (BANWELL, 1964)

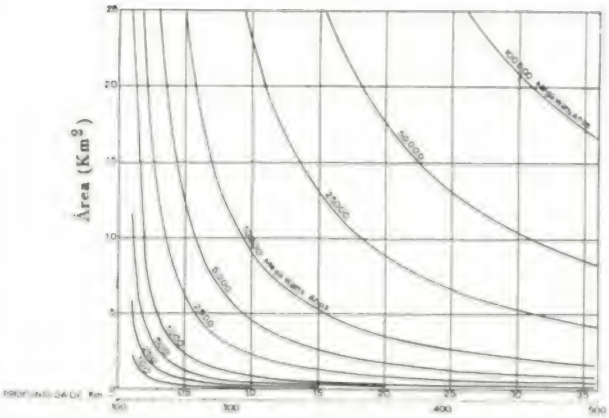


Fig. 2 — Curvas da energia acumulada no sub-solo (BANWELL, 1964)

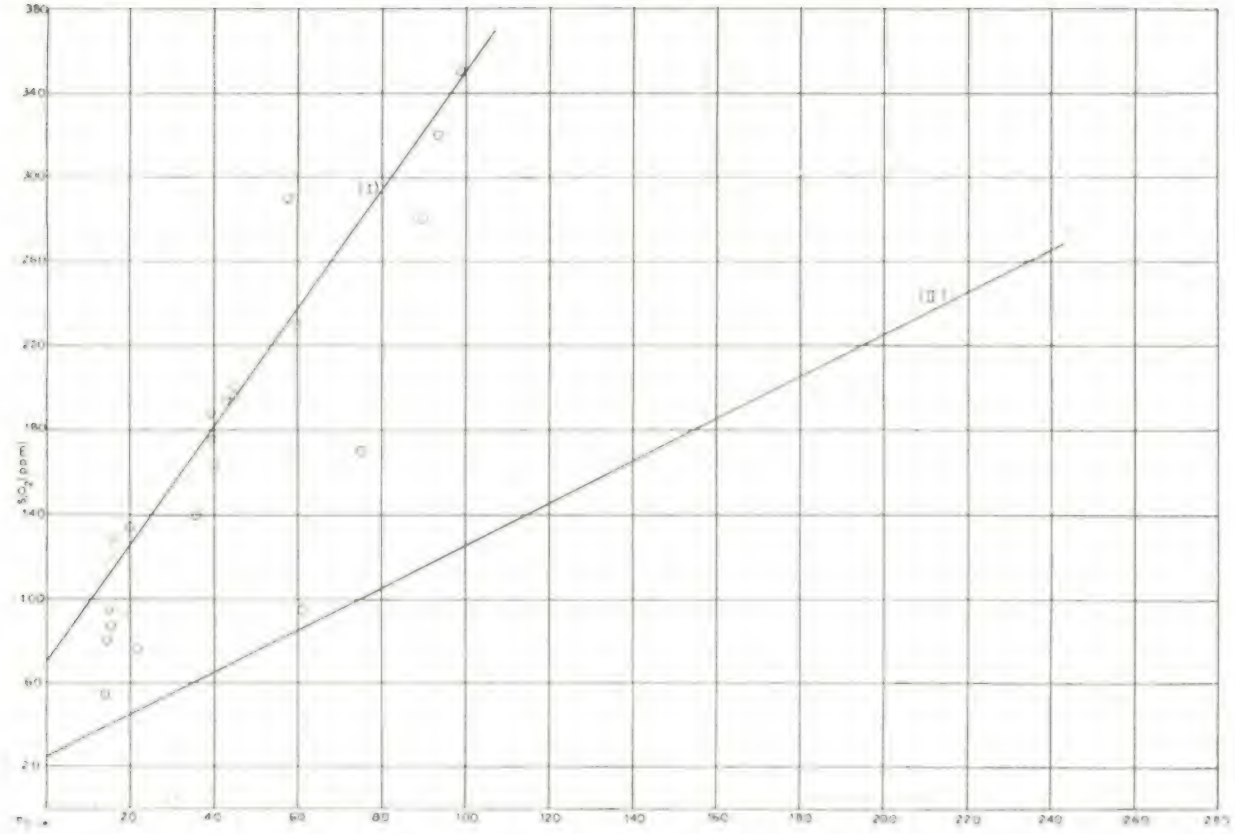


Fig. 3 — Gráfico representando as concentrações de sílica das nascentes das Furnas e suas respectivas temperaturas à emergência. A Curva (I) dá a solubilidade da sílica amorfa em função da temperatura; (II) é a representação gráfica de $25 + T_0 = SiO_2$(ppm) (Bodvarsson and Palmason 1964, p. 93)

QUADRO I

Cálculo dos débitos de massa (Kg/s), das entalpias específicas (Cal/g) e das potências dissipadas e armazenadas (mega-watts) sobre dados de débitos de calor (Kcal/s) observados em Wairakei (Fisher, 1964, p. 173)

Período das observações	Temp de ref. (°C)	Condução		Descarga de vapor a)		Evaporação e radiação		Fontes termais		Totais		Entalpia espec. d) (cal/g)	Potência dissipada e) (MW)	Potência armazenada f) (MW)
		(Kcal/s)	(Kg/s)	(Kcal/s)	(Kg/s) b)	(Kcal/s)	(Kg/s) b)	(Kcal/s)	(Kg/s) c)	(Kcal/s)	(Kg/s)			
1951-52 (Banwell)	12	5 100	—	54 000	86	28 150	45	45 550	518	132 800	649	217	107	40
1951-52 (Healy)	12	5 000	—	54 000	86	23 % do total (30 200)	(48)	(40 800)	(464)	13 0000	(598)	(229)	(112)	(65)
1951-52 (Gregg)	0	5 100	—	55 000	86	28 700	45	61 200	612	150 000	743	202	109	25
1951-52 (Benseman)	12	14 300	—	54 000	86	23 % do total (33 200)	(53)	(41 500)	(472)	143 000	(611)	(246)	(133)	(95)
1951-52 (Fisher)	12	2 800	—	47 000	75	23 900	38	28 800	327	102 500	440	245	93	95
1954 (Ellis, Wilson)	12	10 % do total (8 200)	—	38 % do total (31 160)	(50)	23 % do total (18 860)	(30)	29 % do total (23 780)	(270)	82 000	(350)	(246)	(76)	(95)
1958 (Fisher)	12	2 800	—	47 000	75	26 800	43	19 400	220	96 000	338	296	103	275
1958-59 (Thompson etal)	15	9 000	—	91 000	146	43 000	69	20 000	235	163 000	450	377	214	990

a) Inclui a convecção através do solo e o escape de fumarolas

b) Calculado como vapor a 100 °C

c) Calculado como água a 100 °C

d) Os valores da entalpia específica são relativos a O °C

e) Potência que pode ser mantida por tempo indefinido (dissipação natural)

f) Potência disponível para exploração durante 20 anos, admitindo uma área de armazenamento de 7,2 Km^2 (Thompson etal, 1964, p 399)

QUADRO II

NASCENTES (FUNDAÇÃO)	pH	Temp. °C	Caudal l/min	Condutividade (µ Ω cm)⁻¹	Resíduo seco (180 °C) (p. p. m.)	ANÁLISES QUÍMICAS (p. p. m.) [1] SiO_2	$B_2O_3H_3$	CO_2 (total)	$HAsO_2$	Cl^-	Br^-	I^-	F^-	$SO_4^=$	HCO_3^-	HS^-	NO_3^-	$PO_4H_2^-$	Na^+	K^+	Li^+	Ca^{++}	Mg^{++}	Al^{+++}	Fe^{++}	Mn	Cu	Sr	Ca	Rb	Ba	NH_4^+	As	Pb
CALDEIRA GRANDE	– – 8,14	94,5 98,1 89,0	95 76 61	– 2 460 2 300	1 818 2 045 1 660	299 347,2 251	– 0,18 19,7	– 692 355	– – 0,47	389,9 378 286	– 0,005 Vest.	– 0,003 Vest.	– 0,4 17,7	25,4 73,7 56,6	– 508,1 760,1	24,5 13,6 4,4	– 2,5 0,1	– 1,2 0,04	615,0 617,6 480,0	6,6 29,2 22,8	– 3,9 0,35	Nil 7,1 6,0	– 11,3 0,4	– 0,1 0,065	Nil 4,8 0,24	– 1,6 0,040	– 0,005 0,064	– 0,095	– Vest. Vest.	– Vest. Vest.	– – 0,090	– – Vest.	– 0,17 –	– – Vest.
CALDEIRA ESQUERDA	6,16	87,0	7,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	5,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
ÁGUA SANTA	– – 7,88	80 87 94,2	0,08 0,120 0,90	– – 1 050	723 897,7 –	220 238,8 318	– – 23,4	– 397,7 –	– – –	107,9 79,5 –	– – –	– – –	– – 6,12	24,3 21,3 –	– 240,4 –	9,4 Nil 1,2	– Vest. –	– 2,2 –	243,8 221,5 –	Vest. 22,3 –	– Vest. –	Vest. 7,9 –	– 1,2 –	– 2,2 –	Nil 4,8 –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– Vest. –	– – –	– – –
ASMODEU	– – 7,98	99 93,2 84,5	– – 11,8	– – 2 640	1 636 1 924 –	222 354,9 280	– – –	– 824,5 –	– – –	252,8 279,7 –	– – –	– – –	– – 11,2	140,5 262,1 –	– 392,6 –	23,5 16,9 4,8	– Vest. –	– 1,9 –	577,9 561,8 –	9,1 34,3 –	– Vest. –	– 6,0 –	– 5,4 –	– 1,8 –	Nil 7,1 –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– Vest. –	– – –	– – –
CALDEIRÃO	– 6,98	78,1 75,5	17,7 22	462 496	523 489	180,9 169,4	0,06 5,5	240,6 495,3	– –	38,9 32,3	0,4 –	0,3 –	0,5 2,0	19,0 9,5	276,4 273,9	4,5 1,9	7,1 3,4	1,6 –	191,9 162,6	25,0 14,3	2,5 –	7,0 14,4	4,3 2,1	0,09 –	3,1 0,04	0,5 –	0,02 –	–	Vest.	Vest. –	– –	– –	0,09 –	– –
CALDEIRAS DA LAGOA	– 4,42	– 61,5	– –	– –	276 –	95 –	– –	– –	– –	57,4 –	– –	– –	– –	61,0 –	Nil Nil	– –	– –	– –	58,6 –	2,5 –	– –	2,5 –	– –	– –	2,6 –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –
QUENTINHA	– – 6,45	44 62,0 59,0	290 263 36	– 1 170 1 300	1 014 1 041 1 016	192 225,3 230,4	– 0,15 3,7	– 1 071 992,4	– – –	67,2 67,8 67,5	– 0,001 –	– 0,002 –	– 0,2 3,1	17,6 14,3 16,5	705,7 1 480 712,5	Vest. Nil 0,7	– 38,7 1,0	– 1,3 –	347,9 244,8 242,5	Nil 37,8 41,0	– 2,1 –	2,1 17,2 30,4	– 16,5 10,6	– 0,2 –	2,5 5,0 1,0	– 1,5 –	– – –	– – –	Vest. – –	Vest. – –	– – –	– 0,4 –	– 0,04 –	– – –
PADRE JOSÉ	– – 6,05	51,0 69,0 57,8	7 1,15 12,5	– – 570	612 863,0 –	201 208,3 290	– – –	– 375,0 –	– – –	35,5 61,6 –	– – –	– – –	– – 1,4	77,1 57,6 –	192,4 492,0 –	Vest. Nil 0,7	– Vest. –	– 2,1 –	147,6 220,6 –	Nil 25,9 –	– – –	8,6 12,5 –	– 6,3 –	– 2,1 –	6,9 6,5 –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –
GRETINHA I	– 6,27	46,2 41,1	– 60	– 1 160	926,6 –	186,6 195	– –	1 215 –	– –	67,8 –	– –	– –	– 4,14	16,6 –	687,5 –	Nil 1,2	Vest. –	1,8 –	238,4 –	16,2 –	– –	26,5 –	12,8 –	1,8 –	5,1 2,24	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –
GRETINHA II	– 6,13	41,8 46,3	– –	– 1 150	– –	– 200	– –	– –	– –	70,2 –	– –	– –	– 2,54	– –	– –	Nil 1,2	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– 2,48	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –
MORANGUEIRO	6,40	47,5	2,6	1 590	–	199	–	–	–	–	–	–	15,12	–	–	2,46	–	–	–	–	–	–	–	–	4,02	–	–	–	–	–	–	–	–	–
TORNO	– 6,42	38,2 39,9	84 13,9	– 1 300	– –	– 164	– –	– –	– –	68,2 –	– –	– –	– 4,40	– –	– –	Nil 1,2	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– 4,03	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –
CABAÇOS	5,85	38,0	27	987	520	175	1,7	509	Vest.	57,2	–	–	0,9	10,5	247,7	3,5	0,5	0,07	83,7	20,9	Vest.	20,1	5,1	0,009	7,8	1,62	0,181	–	–	–	–	Vest.	–	–
FÉRREA DA CÂMARA	6,44	38,7	–	1 640	1 224	186,0	0,9	1 462	Vest.	83,1	–	–	2,1	10,4	1 098	–	0,5	–	291,0	49,0	Vest.	54,0	33,8	–	21,0	0,44	0,156	Vest.	–	–	Vest.	–	–	–
SANGUINHAL	–	38	–	–	543	140	–	–	–	36	–	–	–	Vest.	360,3	–	–	–	131,3	–	–	11,4	–	–	19,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–
SANGUINHAL	7,23	34	–	247	–	68	–	–	–	–	–	–	3,74	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CHÃ CARVALHOS BICA ESQUERDA BICA DIREITA	– – –	– 58,4 48,5	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –
ÁGUA PRATA	– 7,24	17,0 20,4	4,8 6,0	– 350	– –	– 135	– –	– –	– –	18,2 –	– –	– –	– 1,2	– –	– –	3,5 1,3	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –
DR. ARLINDO	– 8,45	20,4 19,4	4 7,9	– 480	474,5 353	96,0 94,6	– –	770,0 688,1	– –	52,2 37,3	– –	– –	– 2,1	26,2 12,2	289,8 197,6	Nil Nil	Vest. 2,0	0,6 –	141,2 62,0	22,7 23,6	– –	23,6 18,3	14,0 6,8	0,6 –	1,4 0,07	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –
MIGUEL HENRIQUE	– 8,08	16,3 16,2	4,2 3,6	– 412	– –	– 121	– –	– –	– –	18,1 –	– –	– –	– 1,76	– –	– –	2,1 1,4	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –	– –
ÁGUA AZEDA	– – 7,92	18 15,9 16,2	37 15,2 39,7	– – 306	334 275,1 –	91 101,4 128	– – –	– 2 036 –	– – –	39,9 21,3 –	– – –	– – –	– 1,2 –	29,2 20,9 –	156,4 128,0 –	Nil 0,8 1,2	– Vest. –	– – –	92,0 45,4 –	1,6 10,0 –	– Vest. –	2,8 6,6 –	– 5,6 –	– 2,0 –	2,5 4,7 3,2	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– Vest. –	– – –	– – –
UBALET FRIO	– 4,90	17,8 15,8	3,4 16,7	278 296	287 269	92,8 96	0,01 Nil	2 003 2 302	– 0,39	19,0 17,7	0,002 Vest.	0,001 Vest.	0,12 1,3	26,5 20,6	138,2 120,8	4,4 1,4	2,4 0,5	0,3 0,4	50,5 35,6	12,4 18,4	1,4 0,17	6,2 6,3	5,1 3,7	0,04 0,46	1,9 5,8	0,4 1,4	0,0002 0,013	– –	Vest. –	Vest. –	– –	0,18 Vest.	0,075 –	Vest. Vest.
SERRA TIBIO	4,85	15,8	7,5	281	200,8	87,0	–	1 979	–	20,2	–	–	0,27	8,1	70,8	–	0,5	–	26,4	10,1	0,08	6,57	2,00	–	0,02	0,13	Vest.	–	–	–	–	Vest.	–	–
DR. FREDERICO	5,38	17,7	–	317	–	–	–	–	–	–	–	–	0,50	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
ÁGUA HELENA	4,77	15,8	–	172	–	–	–	–	–	–	–	–	0,58	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
PEDRAS GALEGO	7,09	21,8	–	134	–	76	–	–	–	–	–	–	0,75	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CAMARÇA	6,92	14,9	–	155	–	80,5	–	–	–	–	–	–	0,89	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
GLÓRIA PATIM	6,92	14	–	148	–	55,5	–	–	–	–	–	–	0,47	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
NOSSA SENHORA	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,26	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

a) p.p.m. = partes por milhão

N. B. — Quando se apresenta três séries de valores para cada nascente, elas referem-se respectivamente a 1872 (FOUQUÉ), 1912 (LEPIERRE) e 1953 (H. DE CARVALHO); duas séries são de análises dos dois últimos investigadores e quando se apresenta uma só série de valores diz respeito a 1953.

QUADRO III

LOCAIS DAS COLHEITAS DE GASES	Comp. vol. (%) ref. a 0°C e 760 mm Hg.					
	CO_2	SH_2	O_2	H_2	N_2, ETC	
Quenturas	99,55	Nil	0,04	Nil	0,41	a)
	99,5	Nil	Vest	Nil	0,50	
Junto da Nascente Água Prata	97,50	0,07	0,40	Nil	2,03	
Próximo da Nascente Água Santa	98,0	Vest	0,2	Nil	1,8	
Próximo da «Caldeira» do Esguicho	99,20	0,28	Vest	Nil	0,52	
Próximo da «Caldeira» do Esguicho (Lamas)	99,10	0,37	Vest	Nil	0,53	
«Caldeira» do Esguicho	99,10	0,38	Vest	Nil	0,52	
«Caldeira» dos Vimes	99,30	0,25	Vest	Nil	0,45	
A 7 m. para W da «Caldeira» de Asmodeu	99,10	0,42	Vest	Nil	0,48	
«Caldeira» Grande	98,890	0,950	0,014	Nil	0,146	a)
	98,94	0,21	0,15	Nil	0,70	b)
	99,10	0,44	0,09	0,03	0,34	
Caldeirão	99,30	Nil	0,12	Nil	0,58	
Lagoa das Furnas (Caldeira de Sul)	97,60	0,29	0,40	Nil	1,71	
Lagoa das Furnas (Caldeira de Leste)	96,90	0,06	0,41	0,15	2,48	

a) Fouqué (1872)
b) Lepierre (1912)
NB Todas as outras composições foram obtidas por M Palha (1953)

ESBOÇO TOPOGRÁFICO

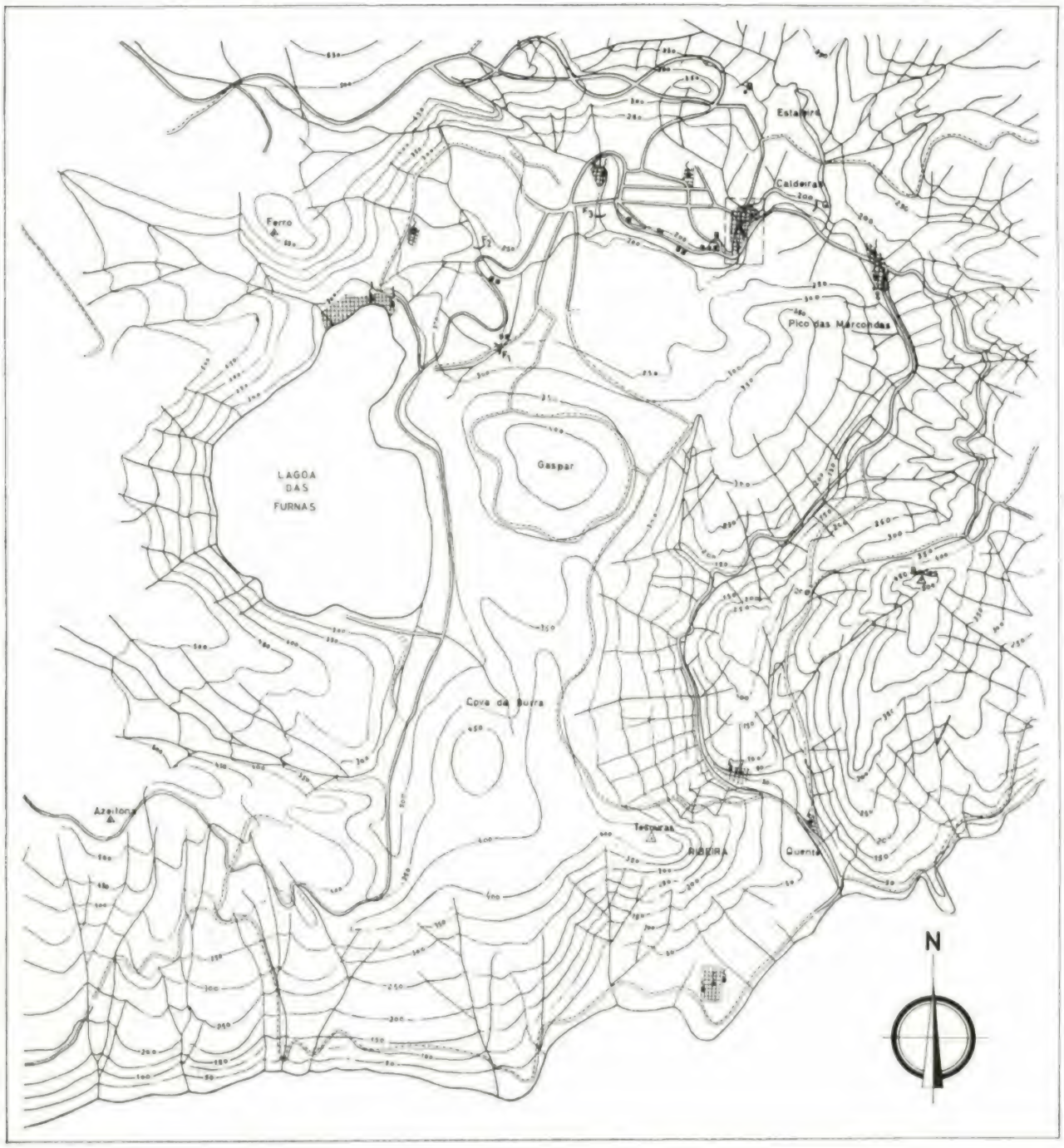
DA

REGIÃO DAS FURNAS

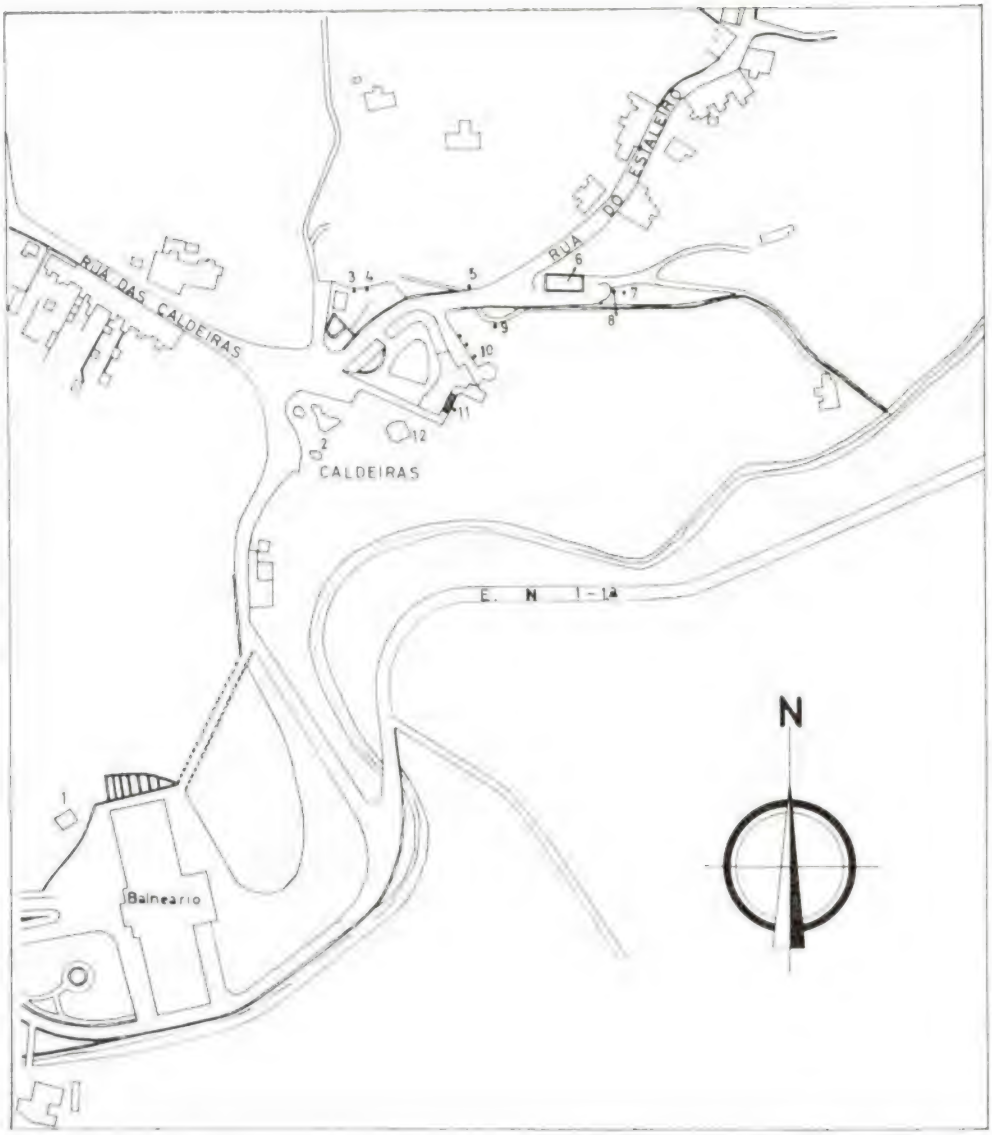
ESCALA 1:40.000

CONVENÇÕES

- Estrada
- Caminho
- Alteração Hidrotermal do Terreno
- Fumarola
- Cursos de Águas Termais
- Nascentes Termais



ÁREAS DAS CALDEIRAS
ESCALA 1:4.000



1 — Quenturas
2 — Caldeira Grande
3 — Água Prata
4 — Água Miguel Henriques
5 — Caldeirão
6 — Chalet Frio
7 — Caldeira dos Vimes
8 — Água Azeda
9 — Água Santa
10 — Caldeira do Esguicho
11 — Caldeira Pero Botelho
12 — Caldeira do Asmodeu

C. D. U. 691.544.62

DEVELOPMENT OF AN EXPANSIVE CEMENT

by MUFID A. SAMARRAI
M. Sc., Research Office r.

A utilização de cimentos expansivos constitue uma das preocupações actuais na construção civil e nas obras públicas. O estudo de tais cimentos tem sido realizado com os objectivos de combater os nefastos efeitos da contracção do cimento por secagem, e de dar ao betão armado um pré-esforço desenvolvido no seu interior que evitaria o trabalho de colocar as armaduras do betão pré-esforçado em tracção prévia.

A nova fórmula que é apresentada para o cimento expansivo resultou de trabalhos levados a cabo no Laboratório Nacional de Engenharia Civil sobre a possibilidade de formação do sulfoaluminato expansivo a partir de reacções do cimento portland com feldspato caulinizado.

A fórmula estudada tem a enorme virtude de ser de aplicação extremamente simples e de fácil obtenção no estaleiro, não necessitando o fabrico de clinquer especial, como até hoje se tem procedido em toda a parte. A simples mistura, na betoneira, de cimento portland normal, gesso, caulino e pozolana, fornece um cimento expansivo.

O engenheiro Müfid A. Samarrai, engenheiro-civil pelo Robert College, de Istambul, Master of Science pela Kansas State University, dos E. U. A., graças a uma bolsa de estudo da Fundação Calouste Gulbenkian fez um estágio de dois anos no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, durante o qual se ocupou com muita competência e devoção do estudo das proporções dos componentes e das propriedades do cimento expansivo assim obtido.

Apresenta-se em seguida um resumo da parte mais importante da Tese para a obtenção do grau de especialista do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, que se refere aos estudos do cimento expansivo.

O trabalho do Sr. Eng.º Müfid A. Samarrai tem, além de outros méritos, o de ter medido as tensões provocadas pela expansão do cimento, quando impedido de se deformar, característica fundamental do cimento expansivo, e que é normalmente ignorada nos trabalhos estrangeiros, preocupados apenas com a grandeza da deformação livre. Além de Lossier, que nos seus trabalhos pioneiros as mediu, muito poucos as determinaram ainda.

Com esta medição comprovou-se, de forma iniludível, que as tensões provocadas pela formação do sulfoaluminato expansivo são extremamente reduzidas — uma escassa dezena de quilogramas por centímetro quadrado — o que não tem qualquer interesse para a obtenção do betão pré-esforçado. Todavia, a não inversão do sinal da expansão torna estes cimentos de aplicação vantajosa nos casos em que interessa combater os efeitos da contracção.

A. DE SOUSA COUTINHO
Engenheiro-civil I.S.T.
Investigador do L.N.E.C.

RESUMO

Cimentos expansivos são cimentos que, nas condições normais de hidratação, sofrem um aumento de volume que contraria a contracção de secagem.

Há, pràticamente, dois tipos de cimentos expansivos: um que evita a contracção e outro de grande poder expansivo, capaz de induzir tensões nas armaduras do betão armado. Todavia, até agora não se conhecem aplicações na construção deste cimento de grande poder expansivo.

SYNOPSIS

Expansive cements are cements that under normal hydration processes undergo an increase in volume which counteracts the shrinkage which cements otherwise exhibit. In practice there are two types of expansive cements, the non-shrinking cement and the selfstressing cement. Up to the present date no field application of the self-stressing cement is reported. In the present study a non-shrinking cement was successfully developed using local materials

No presente trabalho foi estudada a composição de um cimento sem contracção, usando matérias primas existentes no mercado que se adicionam ao cimento portland.

Os componentes expansivos eram constituídos por uma combinação de gesso e de um caulino do norte de Portugal com a qual se obtem a formação de sulfoaluminatos quando em contacto com soluções saturadas de hidróxido de cálcio. Foi utilizada a pozolana de Santo Antão (ilha de Cabo Verde) como estabilizador, para regular a duração das reacções de formação do sulfoaluminato e portanto controlar o aumento da expansão.

O cimento expansivo foi estudado apenas sob a forma de argamassa com a qual se confeccionaram pequenos prismas com 4 × 4 × 16 cm.

Para se obter a expansão é necessário um periodo inicial de cura, dentro de água, após a fabricação da argamassa de cimento expansivo.

Durante o primeiro periodo de cura obtiveram-se expansões da ordem de 2 a 3×10^{-3}; durante a secagem subsequente verificaram-se contracções da mesma ordem. Contudo alguns prismas mostraram expansões superiores ao comprimento inicial, antes da cura, mesmo após 600 dias de secagem.

Apesar deste cimento apresentar resistências de compressão inferiores às dos cimentos normais, sem componentes expansivos, a diferença é muito pequena e para idades muito avançadas as resistências podem até igualar ou ultrapassar as daqueles.

Para percentagens dos componentes expansivos inferiores a 35 a resistência é mais elevada do que no caso do cimento sem adição, mesmo após 7 dias de cura.

A resistência à flexão do cimento com os componentes expansivos é maior do que a do cimento portland.

Foram conseguidas tensões devidas à expansão de uma argamassa mantida a comprimento constante da ordem de 34 kg/cm², mas, em virtude da secagem, tais tensões eram perdidas e apenas para algumas combinações da mistura expansiva de gesso e caulino se conseguiu manter 6 a 8 kg/cm², tensão manifestamente pequena para pôr as armaduras em tensão.

Estudaram-se também os efeitos das condições de cura, da temperatura de conservação, das dimensões dos espécimes e das proporções da mistura dos componentes expansivos.

and studies were restricted to cement mortar prisms. The expansive components were a combination of gypsum and a kaoline from the north of Portugal reported to form sulphoaluminates when in contact with saturated calcium hydroxide solutions. A pozzolana from Santo Antão in the Cabo Verde islands was used as a stabilizer to regulate the duration of the reactions and hence the amount of expansion. Initial expansions in the order of 2 to 3×10^{-3} during the initial curing period were reached and then when allowed to dry they shrank about the same amount. Some prisms kept some expansions over the original length before soaking even after 600 days of drying.

Although these cements exhibited lower compressive strengths than normal cements, without expansive components, however these losses were small and for longer ages would equal or pass it. Also for percentages of expansive component less than 35 percent strengths were higher than the cements alone, even as early as seven days soaking. Flexural strength of most expansive components was better than the portland cement alone.

Expansive stresses as high as 34 kg/cm² were achieved upon soaking for seven days; upon drying great part of the stresses was lost although some combinations kept stresses in the range of 6 to 8 kg/cm².

The effect of curing temperature, richness of mix and restraint were also studied.

INTRODUCTION

Expansive cements are cements that under normal hydration processes undergo an increase in volume which counteracts the shrinkage which cements otherwise exhibit. To appreciate the value of this it is only necessary to bear in mind the disadvantages of shrinkage.

The formation of cracks which facilitates the penetration of water, salt and other aggressive agents to the interior of concrete is one of the greater problems of concreting. In the process of shrinkage stresses might be set up in the concrete which would damage it especially if this takes place after the concrete passes the plastic stage.

Although vast research work has been carried on in this field (Pickett 1948), slight volumetric instability is still being tolerated due to the impractibility of achieving a concrete that does not tend to expand or shrink upon wetting and drying or when initial moisture is lost in a fresh concrete.

The shrinkage is closely related to the availability of moisture, increasing with the drying of concrete and decreasing when ample moisture is

present. Actually concretes swell when they absorb water after periods of drying, the process of swelling and shrinkage might continue during the life of concrete depending on the availability of moisture. This could be very disturbing in reinforced concrete structures, as well as in plain concrete. Hence many investigators (Mather 1965) have directed their attention to eliminate the shrinkage of cements by imposing a controlled expansion using the expansive reaction that might take place between the cement components and any other added agents.

One of the most important reactions that cause the expansion of cement and concrete are those forming the complex sulphoaluminate salts. Candlot (1890) was one of the first that discovered the action of $SO_4^{=}$ on the aluminates and the formation of calcium sulphoaluminate which is an expansive reaction.

Controlling the time of occuring of this reaction and confining it to the early stages of hydration of concrete when it is still plastic and extensible, yet have sufficient strength, is an achievment sought after and referred to as expansive cement.

There are many agents, or combinations of agents that could be used to develop the sulphoaluminate. In the present study it was our intention to use the expansive forces developed in the formation of sulphoaluminate by kaoline. It was reported in a work carried by the L.N.E.C. (Coutinho, 1965) that expansions as high as 3 to 4 percent took place, without disintegrating, when granite prisms with kaolinized feldspath were immersed in sulphate solutions saturated with calcium hydroxide. This brought up the idea that if the high forces accompanied by this expansion should be controlled, it would be possible to benefit from it in making an expansive cement capable of giving high traction to the reinforcements in concrete. It was therefore thought to develop an expansive cement with kaoline and gypsum as the expansive components and pozzolana as the stabilizer.

The expansive cements usually are formed from three basic components, the portland cement, the expansive component and the stabilizer. The purpose of the stabilizer being to regulate the time of occurence of the reactions, to absorb the extra lime and bring the expansion to a stop. The regulation of the quantities of the three components and their relative composition provides the control over the intensity and duration of the reaction.

In practice there are two types of expansive cements, the non-shrinking cement and the self-stressing cement. The non-shrinking cement according to Lossier (1948) provides an initial expansion in the order of 3 to 4 mm per meter in neat paste during the initial curing period and then allowed to dry they will shrink about the same amount. Actually they are misnamed since they are rather shrinkage compensating cements (Li, 1965), since they might shrink as conventional mortars. However, as the expansion before shrinkage may be in the order mentioned above a considerable net expansion is available for inducing stress in restraining steel during the wet period. This would also lead to the lessening of tensile stresses leading to cracking during drying.

The self-stressing cement is proportioned to create an expansion of 20 to 25 mm per m in a neat cement. This would lead to higher expansions in concrete when it hardens which will prestress the high-tensile steel embeded in concrete.

The stresses might reach 30 to 40 kg/cm^2. However, Lafuma (1952) thinks they will never be enough to achieve high tensions in the steel as are obtained mechanically in prestressed concrete. This is because the solubility of the hydrated lime is increased by pressure; this means that in a moist mass of hydroxide subjected to pressure, recrystallization takes place relieving the stresses.

In the measurements of stresses we have done in our work, we have confirmed these ideas; the developed stresses in the expansive cement based on the sulphoaluminate formation are not sufficient for stressing the steel.

The strength of expansive cements is somewhat lower than normal cements for the early ages, up to 28 days, after which their strength might equal or surpass that of portland cement.

The impermeability of expanding cements is much better than for normal portland cements which is one of the great advantages of these cements due do the protection they provide for the reinforcements and the resistance to atmospheric influence.

One of the disadvantages of expansive cements, however, is their sensitivity for atmospheric moisture which necessitates greater care in their handling and the use of special bags. They should not be used with sands and gravels that contain any sulphates, due to their sensitivity to any extra reactions caused by these sulphates.

The bond strength of grouts, used in the tendons of posttensioned prestressed concrete members, containing the expansive components seems to be much higher than grouts using the standard aluminium powder (Polivka and Klein 1961). This is due to the compressive self-stress developed in the grout which is restrained from expansion in the prestress cable. This leads to the increase of the frictional resistance of the wire. The use of these grouts for those purposes seems to be increasing.

The freeze-thaw resistance and scaling resistance of non-shrinking cements seem to be as good as those of normal portland cements (Gustaferro, Greening and Klieger 1966). However for the self-stressing cements these characteristics seem to be low and required heavy reinforcements to improve their scaling, and freezing and thawing resistance.

The non-shrinking cement has already found great applications in precast concrete pressure pipes, underpinning of foundations, repair works, dams, flat roofs, road decks and airfield runways.

The self-stressing cement is still in the experimental stage and the only full application, as till now, is for the selfstressed concrete pipes (Mikhailov 1957) (Mikhailov 1962). However it should find wide application in cast concrete pipes, precast architectural panels, highway pavements and tunnel linings (Li 1965).

The present report will be started with a general review of all available literature on expansive cements and then the scope of the tests will be stated. After the materials used, apparatus, preparation of prisms and test procedures are described a full discussion of the results is presented. Finally the conclusions are given and a list of references used in the text are presented.

LITERATURE REVIEW

The major developments in expansive concrete initiated in France by Lossier (1948). The expansive cement consisted of a blend of portland cement, a blast-furnace slag, and a ground clinker having a composition that included dicalcium silicates, calcium aluminates, and hard-burned calcium sulphate. In making concrete using this cement conventional methods of mixing and placing were employed but to terminate the expansion special methods of curing and cessation of water curing was required. Lossier noted if the expansion took place rapidly, disruption of the mass might occur. Adequate curing to develop strength to resist disruption and by controlling the rate and amount of expansion, a sound expanded product could be obtained.

In general the magnitude of the self-stressing was inadequate for prestressed concrete and was difficult to control the expansion; for this reason not much use is being made of this cement.

Lafuma (1952) reviewed the available data on expansive cements and studied the French cements. He held the believe that the stresses formed by the expansive reactions are not ample to bring about self-stressing due to the nature of the reactions. He established some expansion limits for the neat cement mortars immersed in water using expansive components. According to him the safe limit is up to 20 mm/meter and the dangerous zone extending from 20 to 30 mm/meter. Any expansion beyond the last limit is considered unsound.

The expansive cements in the Soviet Union consist of a portland cement, calcium-aluminate cement, and either plaster of Paris or gypsum (Mikhailov 1957). The use of expansive cement with self-stressed concrete pipes has been started since 1953. The expansive mix consists of mortars with 10 sacks of cementing material per cubic yard (550 kg/m^3) and placed with shotcrete method, centrifugation, or vibrosqueezing equipment. After a fast setting of the mix the elements coated with paraffin are kept in water at 20 °C until it gains ample strength. Afterwards they are put in a hot bath at 70 to 80 °C and the expansions take place under the action of hydrothermal curing. When the reactions are completed and enough stresses achieved this curing is stopped and final curing under 20 °C water is carried. Water/cement ratios as low as 20 to 30 percent are reported to be used.

The earliest major work on expansive cements in the United States was reported by Klein and

Troxell (1958). They prepared an expansive agent by burning a mixture containing calcite, aluminium sulphate, and bauxite which was reported to be containing anhydrous calcium sulphoaluminate. This clinker was ground and mixed with portland cement and a small amount of ground slag. The most important achievement was the system $CaO.Al_2O_3.SO_3$, by determining its X — ray diffraction pattern and those of the particular calcium aluminosulphate anhydrite. Substantial amounts of free lime were also present. Portland cement high in alkalies and C_3A did not produce expansive cements of good quality. Unrestrained expansions for mortars containing about 10 sacks of cementing material per cubic yard of mortar (550 kg/m^3) were as high as 1.0 percent.

Klein, Karby and Polivka (1961), who developed superior compositions with the expansive components of Klein and Troxell (1958), report that with restraint such expansions would be too low to provide adequate stressing of steel and concrete for prestressing purposes. Their expansive component comprised from 20 to 30 percent of the expansive cement, and expansive cement contents were 7 to 10 bags per cubic yard of concrete (390 to 550 kg/m^3).

Their studies covered tests of 2 by 2 by 12 in. concrete prisms and concrete pipes 12 in. long, 12 in. diameter and 2 in. wall thickness. The chemical stressing was accomplished by external restraint with steel rods or steel shells. They conclude from their investigations that the greater the unrestrained expansion, the lower the compressive strength. The reduction in strength accompanying free expansion could be overcome by adequate restraint which seems to improve the compressive stresses greatly. Amount of expansive component, water-cement ratio, curing condition and steel employed in restraining the expansion apparently affect the magnitude of self-stressing greatly.

Lin and Klein (1963) conducted a laboratory study using internal restraint in specimens of pressure pipes, flat slabs and shells aproaching sizes used in practice.

The most significant conclusions to be drawn from their investigations seem to be that the strength and the behaviour of such elements can generally be predicted by the usual elastic and plastic theories for structural analysis. However, this is only applicable to particular composition of expansive cements used in the tests and for the elements and conditions under which the tests were conducted.

Most recently Monfore (1964) studied some expansive cements in the Portland Cement Association Laboratories by mixing portland cement, calcium aluminate cement and gypsum in various proportions.

These components were blended in several proportions in the mixture prior to the addition of water and aggregates. All of the mortars shrank upon drying about the same amount as conventional mortars, that is, 0.1 to 0.2 percent. However, having an expansion before shrinkage of few percent a considerable net expansion was available for inducing stress in restraining steel.

Mortars when restrained showed a compressive strength of about 740 kg/cm^2 at 28 days curing, while the same mortars when unrestrained possessed a compressive strength of about 245 kg/cm.^{2} This shows the disruptive effect of the expansive mechanism, or the beneficial effect of a constant stress on the strength of mortar, a result also obtained by us (§ 4).

Prisms of $2 \times 2 \times 10$ inches were used to study the development of stresses. Some prisms formed stresses up to 350 psi (24 kg/cm^2) in moist curing up to 28 days and then, when dried at 50 percent relative humidity, lost 50 percent of their stresses.

In the studies carried by Klein and Bertero (1963), it seems that the unrestrained expansion of prisms increases with the increase of curing temperature but this does not hold true when the specimens are restrained. The reason being the concrete is gaining rapidly expansion while it is still not capable to exert pressure against the restraining frame and hence, by the time it gains enough strength, most of the expansive reactions are exhausted.

Expansive concrete seems to exhibit creep characteristics, for expansions less than 0.6 percent, equal to those of conventional concrete. Shrinkage, stress-strain and creep characteristics did not differ from conventional concrete.

Expansive concrete has been used in pavements (Spellman, 1963) (Timms 1963) and although the results are not striking, with little modifications great improvements are expected.

TABLE 1

Chemical analysis, compound composition and physical properties of cements and expansive agents used in the study

Components	Oxide components, percent by weight									Compound composition percent by wt.					Specific Gravity	Specific Surface Blaine
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO (Total)	MgO	SO_3	K_2O and Na_2O	CaO (Free)	Loss on Ignition	C_4AF	C_3A	C_2S	C_3S	$CaSO_4$	g/cm³	cm²/g
Portland Cement	18.9	6.5	3.0	61.2	1.9	2.6	0.7	2.0	—	9.0	12.0	23.5	40.5	4.4	3.1	3620
Pozzolana Santo Antão	49.5	20.2	2.3	1.9	1.7	0.3	11.4	—	12.8	—	—	—	—	—	2.2	4270
Kaoline	52.3	33.3	1.3	0.0	Trace	0.0	4.7	—	8.2	—	—	—	—	—	2.6	5250
Gypsum	1.7	0.3	—	37.8	0.3	54.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

These concretes have been used successfully in folded plate roof construction (Chemical and Eng. News 1964). The Concrete Research and Development Corp. (1964) reports the use of expansive concrete with great advantages and without departure from standard construction practices or loss of concreting properties.

SCOPE OF TESTS

The purpose of this study was to design a shrinkage compensating cement using local portland cement, gypsum, kaoline and pozzolana. The investigations were limited to mortar prisms and although some concretes were made the data were note ample to report at this point.

Effects of variation of the percentages of the different components, were closely studied and reported.

All these tests were conducted at controlled laboratory temperature of 20 to 25 degrees centigrades. Water temperature of 25 °C $\pm$ 2.0 C was used all through the tests unless otherwise indicated.

Tests included free expansion, flexural strength, compressive strength of prisms broken in flexure and stresses developed.

A special apparatus was designed and developed for the measurements of expansive stresses and will be described in detail.

MATERIALS

A Portuguese portland cement and a Pozzolana from Santo Antão in the Cabo Verde Islands, were used in the present study. The chemical analysis and finenesses are shown in Table 1.

A local kaoline from the north of Portugal which is reported to cause the formation of sulphoaluminate in concretes when in contact with the sulphates of sea water (Coutinho 1963) was used, the chemical analysis of which is also shown in Table 1. The grading is shown in Table 2.

The gypsum used in the studies was a calcined commercial one. The anhydrous $CaSO_4$ was 7.1 °/₀ and the calcined gypsum was 84.7 °/₀. Free water was reported to be 1.50 °/₀ and the combined one 5.60 °/₀. The CO_2 was 0.055 °/₀ and all other oxide components are shown in Table 1.

A natural sand of good grading and free from sulphates was used. The sand was mostly siliceous and the grading is shown in Table 2.

TABLE 2

Grading of sand and kaoline

Sieve No.	Sieve size mm	Material retained on each sieve, %	
		Sand	Kaoline
4	4.76	0.10	0.00
8	2.38	2 00	0.00
16	1.19	7.40	0.00
30	0.59	33.20	0.00
50	0.297	46.80	0.35
100	0.149	7.90	3.00
200	0.074	1.20	10.85

APPARATUS

The apparatus used for free expansion measurement was a standard length comparator.

The apparatus used for the measurement of the expansive stresses consisted of one removable part and one with the steel wires (Fig. 1). The removable part can be fixed to the main apparatus body by using 4 small screws with a special key. When in position the inside dimension of the complete mold becomes 5 × 5 × 17 cm.

Fig. 1 — The apparatus with stretched wires used in measuring the expansive stresses

The main body of the apparatus consists of two thick plates at the top and bottom. Two side plates 0.25 cm uniform thickness provide the uniaxial restrain and transfers the expansion to the special steel wires connected to it centrally at the ends. The steel wires were corrected for relaxation by heating them under tension at 250 °C for 48 hours. A standard frequency comparator was used to measure the frequency of the stretched wires.

The calibration of the apparatus for measuring the expansive stresses was done by connecting it to a loading device by means of a specially designed U-shaped adapters. The load was applied by using a Universal Machine.

PREPARATION OF PRISMS

The cement and expansive components were mixed dry in a pan prior to mixing with water. The proportions of sand to cement plus expansive components were three to one. The amount of mixing water was enough to provide a W/C ratio of 0.50 and was kept constant for all the mixes. Introduction of the materials and procedure of mixing was according to A.S.T.M. Designation C 305 (1959). Stainless steel reference points were set in the molds used for free expansion studies and great care was taken to keep them free of oil and clean.

TEST PROCEDURES

The expansive test specimens were kept in the moist closet for 24 hours from the time water and cement were mixed together. However after four hours placing in the closet the screws of the removable mold were opened in order to allow the prisms to expand at earlier ages without any additional restraint than that to be measured by the apparatus. After removal from closet a reading was made and molds put in water for 28 days. The storage water was changed each day the first week and each week thereafter. Readings of the stretched wire were recorded every day the first week and in an average of every three days thereafter. After the 28 days curing period the molds were placed in a controlled humidity for the required time. The reading obtained were converted to stresses using a previously prepared calibration chart. The results are given in Table 3.

TABLE 3

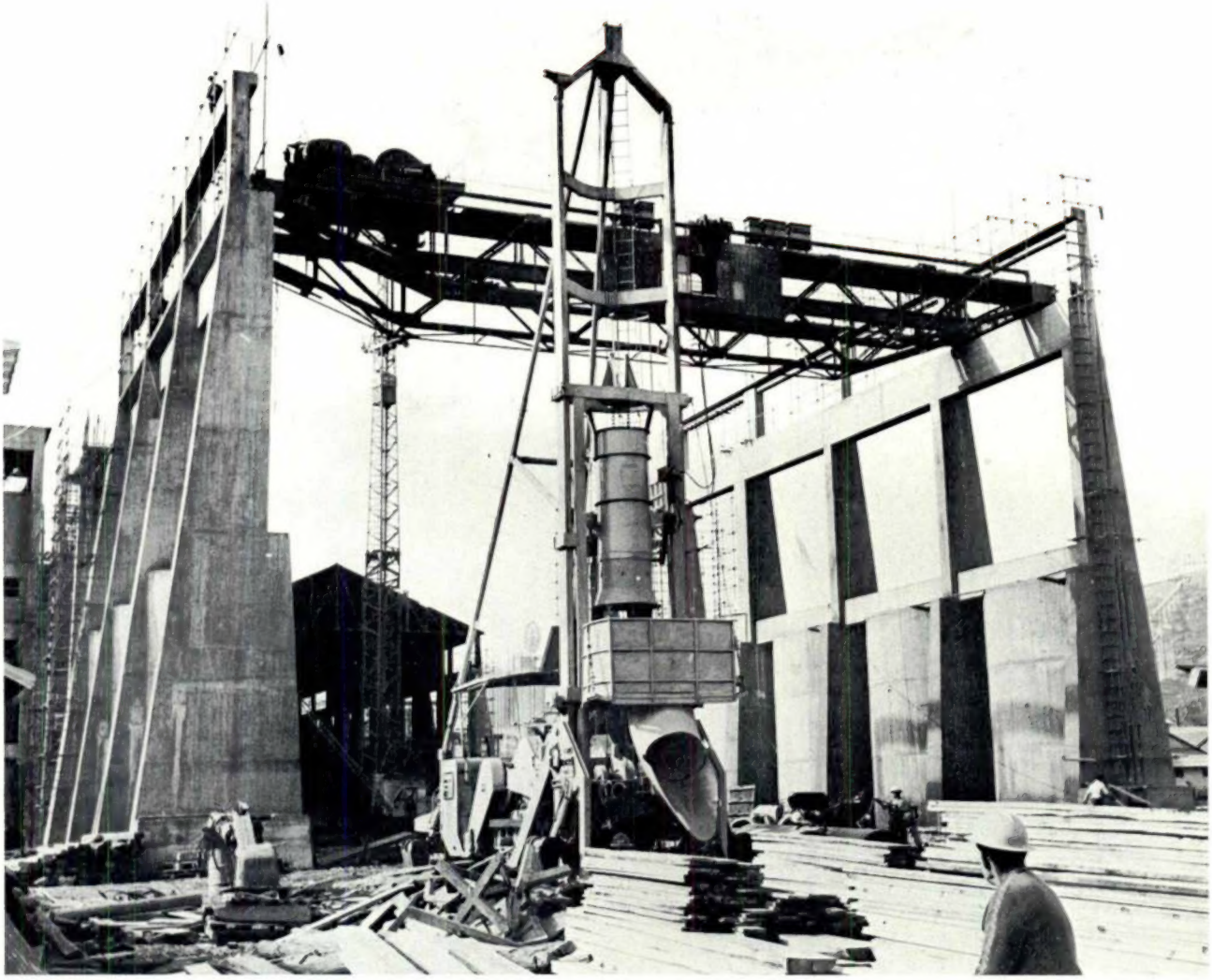
Free expansion and expansive stress properties of mortar prisms with different expansive components

Designation	Components				Expansive stresses, kg/cm²					Free Expansion, 10^{-3}				Shrinkage in 28 days from maximum expansion
	Cement	Kaoline	Gypsum	Pozzolana	Soaking, days		Drying, days			Soaking, days		Drying, days		
	%	%	%	%	7	28	7	14	28	7	28	7	28	%
X0	100	—	—	—	—	—	—	—	—	$\bar{0}.03$	$\bar{0}.04$	$\bar{0}.19$	$\bar{0}.54$	93
X1	57.5	9.0	9.0	24.5	14	26	3	3	3	2.73	2.71	2.07	1.11	59
X2	59.5	9.0	7.0	24.5	16	19	0	0	0	0.89	0.98	0.75	0.31	38
X3	61.5	9.0	5.0	24.5	15	16	4	3	3	0.44	0.51	0.39	0.08	84
X4	59.5	7.0	9.0	24.5	18	24	2	1	1	1.11	1.22	1.16	0.63	49
X5	61.5	7.0	7.0	24.5	18	21	2	1	1	0.62	0.82	0.61	0.32	61
X6	63.5	7.0	5.0	24.5	11	21	8	6	6	0.40	0.58	0.38	0.11	58
X7	61.5	5.0	9.0	24.5	27	29	8	6	6	0.60	1.30	1.18	0.63	51
X8	63.5	5.0	7.0	24.5	25	26	4	3	1	0.80	1.12	0.81	—	—
X9	65.5	5.0	5.0	24.5	20	22	3	3	3	0.90	0.93	0.64	—	—
X11	70.0	9.0	9.0	12.0	23	34	8	8	8	0.76	1.46	0.90	0.37	74
X13	74.0	9.0	5.0	12.0	15	—	0	0	0	0.32	—	—	—	—
X15	74.0	7.0	7.0	12.0	—	—	—	—	—	0.52	—	0.06	—	—
X16	76.0	7.0	5.0	12.0	16	28	4	4	4	0.47	0.64	0.28	—	—
X17	74.0	5.0	9.0	12.0	25	28	2	2	2	0.82	1.11	0.69	0.19	83
X18	76.0	5.0	7.0	12.0	20	23	2	2	2	0.63	0.86	0.43	—	—

Numbers with (—) indicate shrinkage

CONSTRUÇÕES TÉCNICAS, LDA.

PRAÇA DO MUNICÍPIO, 13-3º TELEF. 366506 LISBOA 2 • DELEGAÇÕES: CABO VERDE · ANGOLA · MOÇAMBIQUE



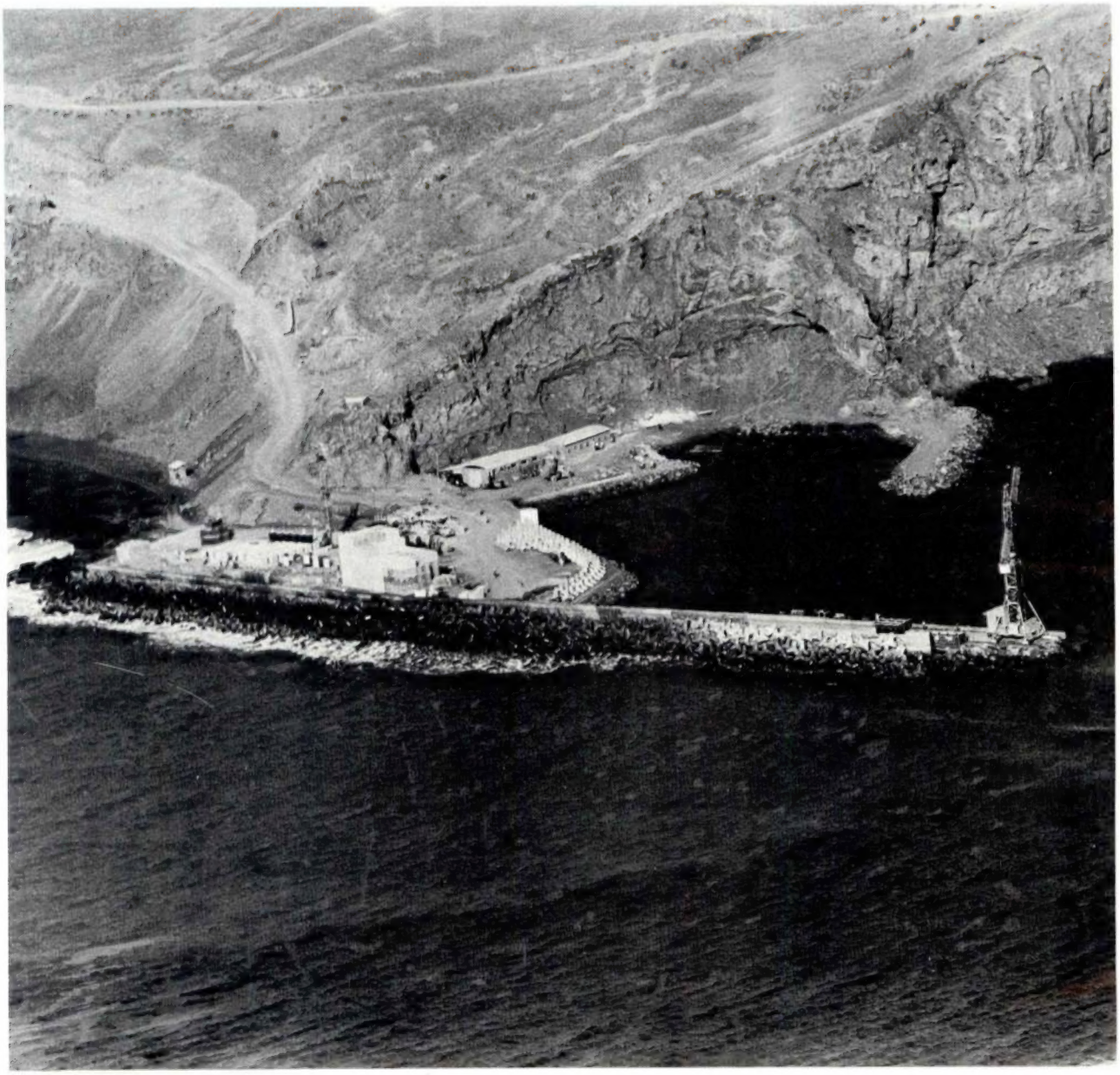
COMPANHIA CIMENTO TEJO — Alhandra — Hangar para clínquer. Fundações com estacas Ø 1,00 metro. Estacas de areia para drenagem do subsolo lodoso.

PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA
OBRAS MARÍTIMAS E PORTUÁRIAS
SILOS E CHAMINÉS
FUNDAÇÕES ESPECIAIS
PONTES E VIADUTOS
CONSTRUÇÕES INDUSTRIAIS

MIRA - 35000

CONSTRUÇÕES TÉCNICAS, LDA.

PRAÇA DO MUNICÍPIO, 13-3º TELEF. 366506 LISBOA 2 • DELEGAÇÕES: CABO VERDE · ANGOLA · MOÇAMBIQUE



MINISTÉRIO DO ULTRAMAR — DIRECÇÃO-GERAL DE OBRAS PÚBLICAS E COMUNICAÇÕES
Ilha do Fogo (Cabo Verde) — Obras Portuárias de Vale de Cavaleiros.

PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA
OBRAS MARÍTIMAS E PORTUÁRIAS
SILOS E CHAMINÉS
FUNDAÇÕES ESPECIAIS
PONTES E VIADUTOS
CONSTRUÇÕES INDUSTRIAIS

The specimens for free expansion studies were removed from the moist closet after 24 hours, from the time of mixing the water and cement. The bars were removed from molds properly identified and the initial length measurement made. The prisms were then stored in water at 20 ± 1 °C and readings made everyday the first week, every week the first month and every month thereafter. After each reading the storage water was changed. Some of the results of these tests are reported in Table 3. The figures are average of three prisms.

In order to evaluate the strength characteristics of the portland cements with and without expansive components a series of tests were conducted on the $4 \times 4 \times 16$ cm prisms. The fabrication of the prisms was the same as explained before for the free expansion tests, only the molds were without any reference points. The prisms were removed from the moist closet and put in storage water for the required time. The results are reported in Table 4.

DISCUSSION OF RESULTS

1. EFFECT OF COMPOSITION

In Tables 3 and 4 are shown results of tests on $4 \times 4 \times 16$ cm mortar prisms manufactured for the study of the effect of composition on the properties of expansive cements with low expansions, as shrinkage compensating cements. It is noteworthy that the 7 days expansions of all the prisms were very high and close to the 28 days values. This would indicate that in the early periods the expansions were rapid reaching the maximum value in few days and then ceasing to register any further expansion. This indicates that the sulphoaluminate reactions were exhausted in the early days, as shoud be in this type of cements, and the gypsum was completely combined.

Figure 2 illustrates the effect of using 9 percent kaoline, 24.5 percent pozzolana and 5 to 9 percent gypsum on the free expansion of prisms soaked in water. The curves for the three percentages of gypsum showed similar shapes having steep ascending slopes at the early seven to ten days and then coming to horizontal position for the rest of the curing period. The 5 percent gypsum showed the lowest expansion and the 9 percent the highest, reaching up to 2.7×10^{-3}.

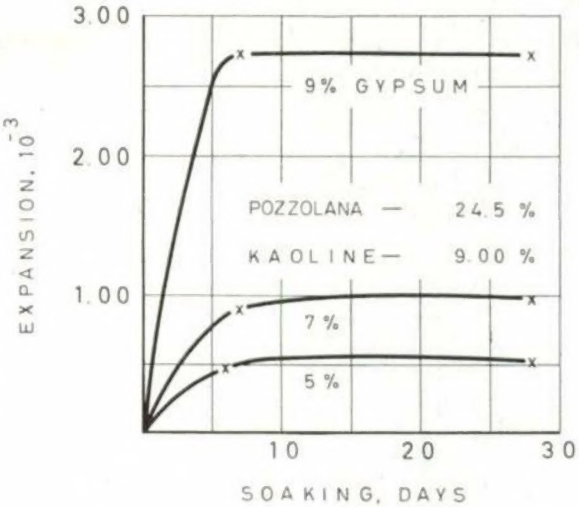


Fig. 2 — Expansion of $4 \times 4 \times 16$ cm mortar prisms with different gypsum contents

The difference between the 9 and 7 percent expansion was greater than between the 7 and 5 percent. This shows clearly that expansions varied directly with the content of gypsum; with the increase of gypsum content both the rate of expansion and the value of maximum expansion increased.

Figure 3 demonstrates the influence of variation of koaline contents from 5 to 9 percent on the free expansion of $4 \times 4 \times 16$ cm mortar prisms soaked in water. The prism containing 5 percent kaoline continued to expand all through the 28 days soaking as can be seen from their curve. This indicates that the koaline content was not ample to absorb all the sulphates available. The curve of the prisms containing 7 percent kaoline showed a steep slope in the early 10 days and then it took a horizontal position which indicate the ceasing of the reaction. The maximum values reached by these prisms were however lower than those of 5 percent. The prisms containing 9 percent kaoline showed the highest rate of expansion among the three percentages reaching expansions of 2.7×10^{-3} in seven days. These expansions were almost twice as high as those of the prisms containing 7 percent kaoline. The foregoing discussion shows that the increase of kaoline content increases the rate of gain of expansion although it does not necessarily increases the maximum expansion except

for percentages higher than 7 percent. In the preliminary studies which are not reported, prisms with contents higher than 9 percent did not show any advantages over the prisms containing 9 percent kaoline.

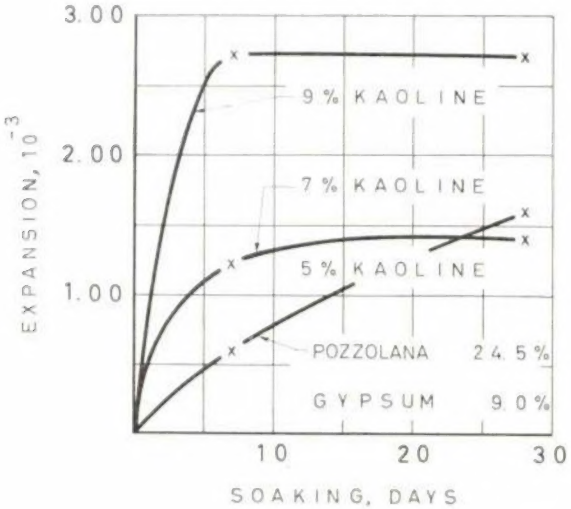


Fig. 3 — Expansion of 4×4×16 cm mortar prisms with different kaoline contents

To study the effect of variation of pozzolana figure 4 is drawn from data of Table 3. The prisms used in this figure contained 9 percent gypsum and 9 percent kaoline. Two pozzolana percentages of 12 and 24.5 were presented and the curves are shown. The analysis of the curves indicates that the prisms with 24.5 percent pozzolana exhibited much higher expansions than

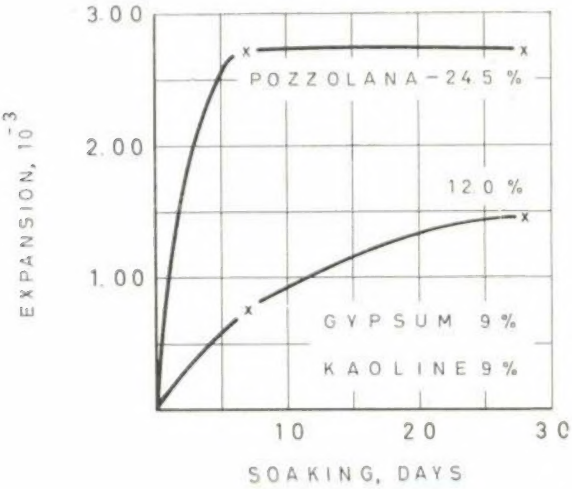


Fig. 4 — Expansion of 4×4×16 cm mortar prisms with different pozzolana contents

those with the 12 percent. The other principal difference between the two curves is the rapid rate of expansion of prisms with 24.5 percent which reached their maximum expansion in 7 days and then ceased to expand. This is contrary to the 12 percent prism which possessed a lower rate of expansion and even up to 28 days the expansion did not come to a stop. It appears therefore that an increase in pozzolana contents terminates the reaction faster and at a higher maximum value.

Although this was the general effect of pozzolana yet there was some exceptions as the case with prisms containing 5 percent gypsum and 7 percent kaoline where the 12 percent pozzolana showed higher expansions than prisms with 24.5 percent pozzolana as can be seen from Table 3.

The effect of composition on the shrinkage properties of these prisms can be easily visualized from Table 3. The prisms after the 28 days soaking were allowed to dry in 50 percent humidity room, the length of these prisms after 7 and 28 days drying are given in the table. Also given the percent shrinkage of these prisms in 28 days from the maximum expansion reached at the end of the soaking period. The control prisms, without expansive additives, exhibited one of the highest shrinkages — 91 percent from maximum length upon soaking. Among the prisms containing different combinations of expansive components and 24.5 percent pozzolana, the least shrinkage was exhibited by prisms X2 which contained 9 percent kaoline and 7 percent gypsum, the next lower shrinkage was exhibited by X4 prisms which contained 9 percent gypsum and 7 percent kaoline. The highest shrinkage percentage was 84 percent for prisms containing 5 percent gypsum and 9 percent kaoline. It seems that for this combination of components the higher the gypsum plus kaoline contents the lower the shrinkage percentage and vice versa.

For the prisms containing 12 percent pozzolana, the shrinkage in 28 days was higher than the shrinkage of similar prisms with 24.5 percent pozzolana. It seems therefore that the reduction of pozzolana content increased the 28 days shrinkage of the prisms. This might not be true for other combinations of gypsum and kaoline, however data were not available at the time of presenting the report.